

ВЕСТНИК

Белорусско-Российского университета

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

Периодичность – 4 раза в год

3(48) 2015

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

БОРИСЕНКО Л. А. Основы проектирования планетарных механизмов с промежуточными телами качения радиального типа.....	6
ДОВГАЛЕВ А. М. Инструменты для магнитно-центробежного и комбинированного накатывания поверхностей деталей машин	15
КАПИТОНОВ А. В., САСКОВЕЦ К. В., КАСЬЯНОВ А. И., ЛЕШКО Д. В., ФИЛЬЧЕНКО П. А. Автоматизированное проектирование конструкций малогабаритных радиально-плунжерных редукторов с использованием современных САПР	25
ЛОВШЕНКО Ф. Г., ЛОВШЕНКО Г. Ф. ФЕДОСЕНКО А. С. Структура, фазовый состав и свойства газотермических покрытий из механически легированных термореагирующих композиционных порошков системы «никель-алюминий-оксид никеля».....	33
МИНАКОВ А. П., ИЛЬЮШИНА Е. В., АФАНАСЬЕВ П. В., СУВОРОВ А. Г. Современные технологии финишной обработки гильз гидроцилиндров	45

РЫНКЕВИЧ С. А. Управление и диагностика мобильных машин на основе бортовой микроэлектроники: этапы и перспективы	57
ТАРАСИК В. П. Математическая модель теплопередачи в дисковых фрикционах трансмиссий мобильных машин	68
ШЕМЕНКОВА А. Л., ЛОВШЕНКО Ф. Г., ШЕМЕНКОВ В. М. Влияние тлеющего разряда на структуру и фазовый состав режущей оксидно-карбидной керамики	79

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

КАПУСТИН А. Г., КАРНАУХОВ Н. С. Принципы построения цифровых систем управления автономными системами электроснабжения	88
КОВАЛЬ А. С., ЛАГУН Н. С., КАБУШЕВА В. В. Передаточные функции электромеханической системы лифта на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами	95

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

БОРИСОВ В. И., СЕРГЕЕВ С. С., НИКИТИН А. С. Тонкая структура акустического поля излучения пьезопреобразователей на основе круглых пьезопластин	102
СЕРЕНКОВ П. С. Применение непараметрических моделей оценивания неопределенностей результатов измерений	109
ШИЛОВА И. В. Исследование свойств микроструктурных волоконных световодов с целью построения на их основе датчиков механических величин	116

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

ГОЛУШКОВА О. В., КОМАРОВА С. Л., ЯНОВИЧ Д. Д. Сэндвич-панели как альтернатива классическим строительным материалам и оценка их конкурентоспособности	127
ДАВИДЕНКО А. А., ДАВИДЕНКО М. А., БАМБУРА А. Н., БЕРЕЗИН В. Б., ПИЛИПЕНКО А. П. Исследование деформирования и разрушения железобетонных колонн круглого сечения при поперечном изгибе с использованием метода корреляции цифровых изображений	135

КАТКАЛО Ю. А., ТУЛУЕВСКИЙ Н. В., ДРОЗДОВ Д. Н., ДОРМАКОВСКИЙ И. М. Применение электронных тахеометров для контроля качества работ при строи- тельстве автомобильных дорог	143
--	-----

- *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

BORISENKO L. A. Basics of the design of planetary mechanisms with intermediate rolling bodies of radial type	6
DOVGALEV A. M. Tools for magneto-centrifugal and combined roll forming of surfaces of machine components	15
KAPITONOV A. V., SASKOVETS K. V., KASYANOV A. I., LESHKO D. V., FILCHENKO P. A. Computer-aided design of small-size radial plunger reducers using advanced CAD	25
LOVSHENKO F. G., LOVSHENKO G. F., FEDOSENKO A. S. Structure, phase composition and properties of gas-thermal coatings from mechanically alloyed thermo-reactive composite powders of the «nickel–aluminum–nickel oxide» system	33
MINAKOV A. P., ILYUSHINA Y. V., AFANASYEV P. V., SUVOROV A. G. Modern technologies of hydrocylinder liners finishing	45
RYNKEVICH S. A. Control and diagnostics of mobile machines based on on-board microelectronics: stages and prospects	57
TARASIK V. P. Mathematical model of heat transfer in disk-type friction clutches of mobile machines transmissions	68
SHEMENKOVA A. L., LOVSHENKO F. G., SHEMENKOV V. M. Effect of glow discharge on the structure and phase composition of cutting oxide carbide ceramics	79

ELECTRICAL ENGINEERING

KAPUSTIN A. G., KARNAUHOV N. S. Principles of creating digital control systems for autonomous power supply systems	88
KOVAL A. S., LAGUN N. C., KABUSHEVA V. V. Transfer functions of the elevator electromechanical system on the basis of a permanent magnet synchronous motor	95

INSTRUMENT MAKINGNG

BORISOV V. I., SERGEEV S. S., NIKITIN A. S. Fine structure of the acoustic field of radiation of piezoelectric tranducers on the basis of circular piezoelectric crystal plates	102
SERENKOV P. S. Application of nonparametric models for uncertainty estimation of results of measurements	109
SHILOVA I. V. Investigation of prorerties of microstructu- red fibers for construction of mechanical sensors.....	116

CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE

GOLUSHKOVA O. V., KOMAROVA S. L., YANOVICH D. D. Sandwich panels as an alternative to traditional construction materials and their competitiveness estimation	127
DAVYDENKO A. A., DAVYDENKO M. A., BAMBURA A. N., BEREZIN V. B., PILIPENKO A.P. Study of deformation and failure of reinforced concrete columns of circular cross section during transverse bending by using the digital image correlation method.....	135
KATKALO Y. A., TULUYEVSKIY N. V., DROZDOV D. N., DORMAKOVSKIY I. M. Application of electronic tacheo- meters to control quality of work in road construction	143

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.865

Л. А. Борисенко

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ТИПА

UDC 621.865

L. A. Borisenko

BASICS OF THE DESIGN OF PLANETARY MECHANISMS WITH INTERMEDIATE ROLLING BODIES OF RADIAL TYPE

Аннотация

Рассматривается образование, свойства и основы проектирования планетарных механизмов с промежуточными телами качения радиального типа с ведущим кулачком в виде эксцентрика. Установлены общие признаки передач осевого и радиального типа. Предложена схема заменяющего рычажного механизма, на ее основе получены формулы для построения профиля зубьев многопериодного кулачка. Описываются конструкции и результаты испытаний опытных образцов механизмов.

Ключевые слова:

планетарная передача, кулачковый механизм, тела качения, передаточное отношение, заменяющий механизм, профиль зубьев, заострение зубьев.

Abstract

The paper deals with the formation, properties and design principles of planetary mechanisms with intermediate rolling bodies of radial type with a leading cam in the form of an eccentric. The general features of the gear of axial and radial type are defined. The design diagram of a substitute lever mechanism is proposed, and, on its basis, the formulas for constructing the teeth profile of a multi-period cam are obtained. Designs and test data of the prototype mechanisms are described.

Key words:

planetary gear, cam mechanism, rolling bodies, gear ratio, equivalent mechanism, teeth profile, teeth point.

В последнее время активно изучаются механизмы с новым видом зацепления с использованием промежуточных тел качения, шариков или роликов. Хотя такие механизмы известны уже достаточно давно [1], практическое их использование стало возможным благодаря доступности новых технологий металлообработки. Эти передачи нельзя классифицировать как обычные зубчатые передачи, т. к. преобразование дви-

жения осуществляется с помощью кулачков специального профиля и тел вращения в виде шариков или роликов. Количество модификаций механизма велико и продолжает непрерывно расти. К настоящему времени известно несколько десятков схем механизмов с промежуточными телами качения [2]. Разнообразны также названия передач: передача со свободными телами качения, шариковая планетарная передача,

синусо-шариковая передача, радиально-плунжерная передача, волновая передача с промежуточными звеньями, передача Synkinetics и т. д.

Отмечаются следующие преимущества рассматриваемых передач перед планетарными: выше КПД, более высокие передаваемые мощности, лучшие массогабаритные характеристики, низкая стоимость производства при той же долговечности и точности [2].

Если принять за классификационный признак направление перемещения тел качения, можно различать передачи осевого и радиального типов. Передача осевого типа, в частности, рассмотрена в [3, 4].

В настоящее время наибольшее применение находит передача радиального типа с эксцентриком (рис. 1) [5, 6]. Эту передачу можно рассматривать как

комбинацию прямого однопериодного кулачкового механизма в виде эксцентрика, работающего в режиме кулачок–толкатель и обратного многопериодного кулачкового механизма, работающего в режиме толкатель–кулачок. Оба кулачка имеют общую ось, толкатель выполнен в виде тела вращения (шарика или ролика), который принято называть промежуточным телом качения. Исходя из этого передачу можно назвать эксцентрико-кулачковой. В других более сложных вариантах эксцентрик заменяется кулачком специального профиля, овалом или двумя оппозитными эксцентриками. Возможен также инверсионный вариант механизма, в котором ведущий эксцентрик выполнен в виде цилиндрической поверхности, внутри которой размещается многопериодный кулачок с внешними зубьями [7].

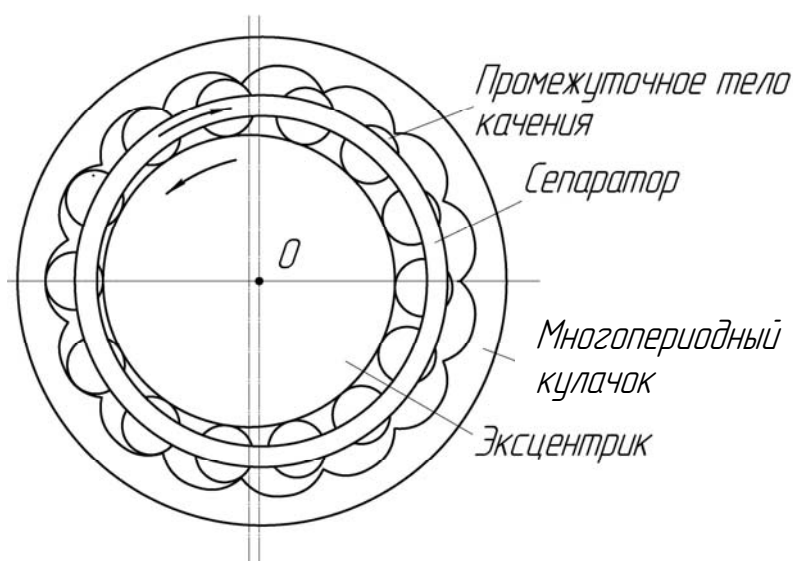


Рис. 1. Радиальная передача с промежуточными телами качения с эксцентриком

Структурно механизм подобен планетарному механизму схемы 2К–Н, содержащему центральное колесо, сателлит, внешнее колесо и водило, с тем отличием, что сателлит (в данном случае тело качения, например, ролик) имеет возможность поступательно перемещаться в радиальном направлении

относительно водила. Ролик, перемещаясь в радиальном пазу водила и взаимодействуя с зубом неподвижного внешнего кулачка, вынужден перемещаться относительно последнего, заставляя тем самым вращаться водило. Водило в этом случае принято называть сепаратором. Благодаря наличию нескольких

роликов, находящихся в разных фазах движения, вращение водила не прекращается даже на фазе возврата первого ролика в исходное положение.

Идея образования радиальной передачи с промежуточными телами качения может быть проиллюстрирована условным графическим построением (рис. 2). Будем считать, что в точках пересечения радиальных прямых и отрезков, рассматриваемых как боковые профили зубьев, помещены тела качения. Рисунок содержит две симметричные части. При перемещении тел качения (в правой части рисунка) вдоль неподвижных радиальных прямых от центра происходит их взаимодействие с профилями зубьев, приводящее к тому,

что зубья вынуждаются к перемещению путем поворота против часовой стрелки. При перемещении тел качения к центру зубья поворачиваются по часовой стрелке. Перемещение тел качения по радиальным прямым можно обеспечить, например, однопериодным кулачком в форме эксцентрика, содержащим участки подъема и опускания профиля. Если левый и правый боковые профили кулачка симметричны, то поднимающиеся тела качения (в правой части рисунка) и опускающиеся тела качения (в левой части рисунка) обеспечивают согласованное вращение против часовой стрелки, т. к. профили слева и справа разнонаправлены.

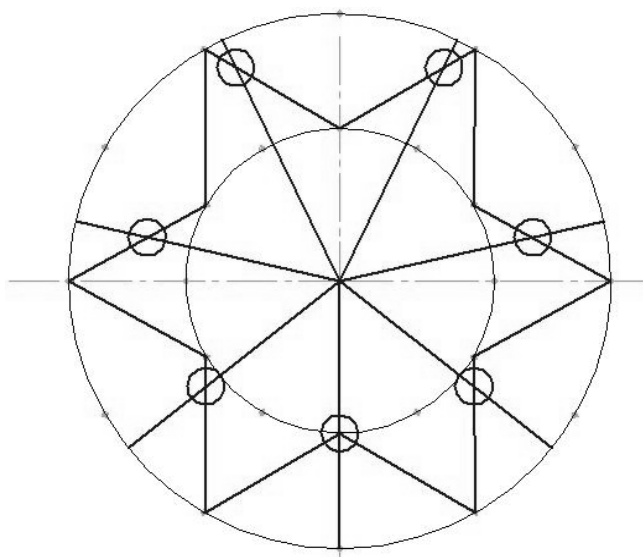


Рис. 2. Принципиальная схема радиальной передачи

Для осуществления вращения необходимо соблюдение обязательного условия: при однопериодном ведущем кулачке число радиальных прямых должно быть на единицу больше или меньше числа зубьев. Это требование вытекает из геометрических свойств пересекающихся линий, служащих профилями зубьев кулачков. В этом нетрудно убедиться, выполнив элементарные геометрические построения. При

этом число зубьев многопериодного кулачка может быть любым, т. е. четным или нечетным.

Если число роликов меньше числа зубьев кулачка, то угловой шаг роликов, который совпадает с угловым шагом прорезей сепаратора, больше, чем угловой шаг зубьев кулачка, и для своего размещения во впадине ролик должен оттолкнуть левую половину профиля зуба вперед. Следовательно, возникает

вращение кулачка в ту же сторону, что и эксцентрика. Если число роликов больше числа зубьев, то угловой шаг роликов меньше углового шага зубьев кулачка и для своего размещения во впадине ролик должен оттолкнуть правую часть профиля впадины. Следовательно, возникает вращение кулачка в сторону, противоположную вращению эксцентрика.

Предпочтительнее принимать число роликов меньшим числа зубьев кулачка, т. к. в этом случае угловой шаг будет больше, а значит, будут шире промежутки между прорезями сепаратора. Чем меньше прорезей, тем прочнее сепаратор.

Несмотря на внешнее различие, передачи радиального и осевого типов принципиально идентичны. Для подтверждения преобразуем рис. 2, условно развернув всю картину вдоль прямой линии, — получим принципиальную схему осевой передачи. Отсюда будут справедливы основные выводы, подробно изложенные в [2].

Передача может работать в режиме планетарном, рядовом или дифференциальном. При изменении числа прорезей сепаратора происходит изменение величины и знака передаточного отношения (реверсирование движения).

Передаточное отношение радиаль-

ной передачи определяется по формуле

$$i_{nl} = 1 - i_{zp},$$

где i_{nl} — передаточное отношение передачи; i_{zp} — передаточное отношение сопутствующей рядовой передачи.

Формула совпадает с известной формулой Виллиса для обычного планетарного механизма. Заметим, что формула справедлива и для передач с промежуточными телами качения осевого типа [4].

Предполагается, что в рассматриваемом механизме все тела качения контактируют с зубьями кулачка. Это возможно только в том случае, если радиус тела качения меньше минимального радиуса кривизны центрального профиля кулачка. Поскольку обычно это условие по конструктивным соображениям не выполняется, при изготовлении методом фрезерования профилей зубьев как эквидистантных кривых к центральному профилю возникает заострение зубьев на тех участках, где радиус кривизны центрального профиля оказывается меньше радиуса тела качения. Вследствие этого часть кривой, эквидистантной к центральному профилю, не воспроизводится на профиле зуба. Как видно из рис. 3, действительный профиль зуба кулачка только на некотором участке соответствует центральному профилю.

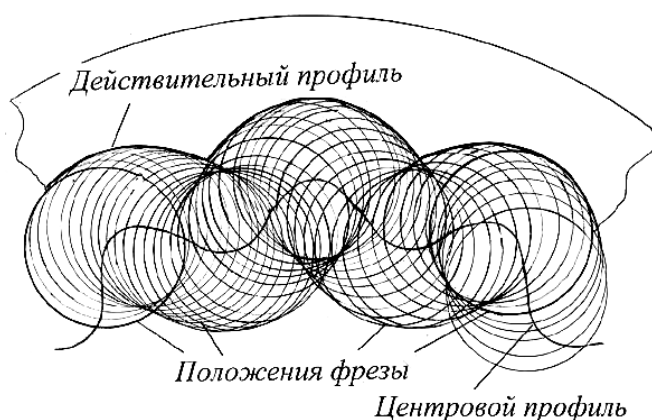


Рис. 3. Заострение профилей зубьев

Таким образом, расстояние между поверхностью эксцентрика и поверхностью зуба в радиальном направлении оказывается больше диаметра тела качения. Тело качения не удерживается этими поверхностями в определенном положении, а свободно плавает. Это иллюстрируется рис. 3, а также показано на рис. 1.

Кроме этого, передача усилия в высшей кинематической паре, каковой является пара тело качения–кулачок, может происходить только в направлении замыкания кинематической пары, т. е. на половине действительного профиля кулачка. Это уменьшает количество активных тел качения наполовину. В итоге лишь несколько тел качения участвуют в передаче усилия. Число зубьев, задействованных в передаче усилия, определяет коэффициент перекрытия передачи.

Профиль зуба многоприводного кулачка не может быть произвольным или соответствовать априорно выбранной кривой. Он однозначно определяется выбранным профилем ведущего кулачка и должен обеспечивать выполнение основного закона зацепления или, по-другому, строгое постоянство передаточного отношения. В противном случае передача хотя и может работать, но эффективной не является.

Для установления закономерности образования профиля зуба рассмотрим заменяющий рычажный механизм. Как известно из теории механизмов, эксцентрик с роликом и водилом можно рассматривать как центральный кривошипно-ползунный механизм с расширенной цапфой кривошипа, поглотившей кривошип, который в таком случае превращается в эксцентрик. Водило в этой схеме играет роль стойки (рис. 4).

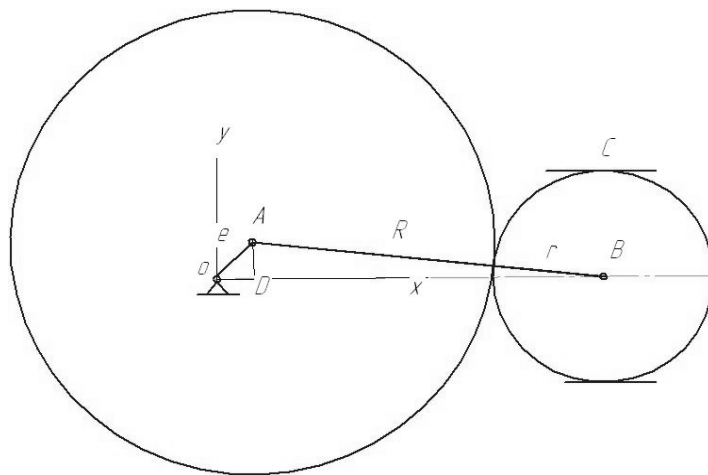


Рис. 4. Эксцентрик с роликом и водилом, заменяющий кривошипно-ползунный механизм

Число таких механизмов, равномерно размещенных по окружности относительно центральной оси механизма, равно числу роликов. Рассмотрим прямоугольные треугольники OAD и DAB. Отсюда

$$\begin{aligned} x_B &= e \cos \alpha + (R + r) \cos \beta; \\ e \sin \alpha &= (R + r) \sin \beta, \end{aligned} \quad (1)$$

где α – угол поворота кривошипа; β – угол между шатуном AB и осью x; e – величина эксцентриситета; R – радиус эксцентрика; r – радиус ролика.

Из последнего уравнения следует, что

$$\begin{aligned} \sin \beta &= \lambda \sin \alpha; \\ \lambda &= \frac{e}{R + r}. \end{aligned}$$

Производя подстановку

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$$

в (1), получим

$$x_B = e \cos \alpha + (R + r) \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$$

или

$$x_B = e \cos \alpha + (R + r) \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}.$$

Для построения профиля зубьев внешнего кулачка необходимо знать декартовы координаты соответствующего центрального профиля. Переход от полярных координат к декартовым осуществляется по формулам:

$$x = \rho \cos \varphi;$$

$$y = \rho \sin \varphi,$$

где ρ – полярный радиус, $\rho = X_c$; φ – полярный угол, в данном случае $\varphi = \frac{\alpha}{z}$,

поскольку полному повороту внутреннего кулачка соответствует угловой шаг зубьев, который равен $2\pi/z$. Если угол α изменяется равномерно, то равномерно будет изменяться и полярный угол φ .

Постоянство скорости вращения является следствием того, что профиль зуба определяется условиями равномерного изменения полярного угла φ .

Декартовы координаты точек профиля:

$$X_B = x_B \cos \varphi;$$

$$Y_B = x_B \sin \varphi.$$

После соответствующих подстановок получим в окончательном виде формулы для вычисления декартовых координат профиля зуба многопериодного кулачка:

$$X_B = (e \cos \alpha +$$

$$+ ((R + r) \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha})) \cos \frac{\alpha}{z}; \quad (2)$$

$$Y_B = (e \cos \alpha +$$

$$+ ((R + r) \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha})) \sin \frac{\alpha}{z}. \quad (3)$$

В этих формулах переменная α изменяется в пределах от 0 до 2π . Анализ уравнений показывает, что описываемая ими кривая не относится к классу циклоид или каких-либо других известных кривых.

Описанным выше способом, используя заменяющий кривошипно-ползунный механизм, получили формулы для многопериодного кулачка инверсионного варианта радиального механизма с внутренними зубьями [7].

Формулы (2) и (3) применяются при изготовлении многопериодного кулачка на станке с ЧПУ, а также для передач, в которых эксцентрик заменен кулачком с произвольной формой профиля – в этом случае параметр R является функцией угла поворота ведущего кулачка.

Изготовлен и испытан опытный образец двухступенчатого планетарного редуктора, в котором в тихоходной ступени использован описанный выше планетарный механизм с промежуточными телами качения радиального типа, а в быстроходной ступени – циклоидально-цевочный планетарный редуктор (рис. 5). Ступени соединены крестовой муфтой.

В представленной на рис. 5 конструкции тихоходной ступени радиус эксцентрика составляет 42 мм, эксцентриситет – 4 мм, число зубьев многопериодного кулачка – 12, число роликов – 11, диаметр роликов – 16 мм.



Рис. 5. Общий вид опытного образца двухступенчатого редуктора с промежуточными телами качения радиального типа во второй ступени

В этом случае уравнения (2) и (3) имеют следующий вид:

$$X_B = (4 \cos \alpha + (45 \times \sqrt{1 - 0,0077 \sin^2 \alpha})) \cos(0,0833\alpha);$$

$$Y_B = (4 \cos \alpha + (45 \times \sqrt{1 - 0,0077 \sin^2 \alpha})) \sin(0,0833\alpha).$$

Опытная проверка изготовленного опытного образца в динамическом режиме подтвердила его работоспособность, люфтов и заклиниваний не наблюдалось. Визуально и проверкой по пятну контакта установлено, что в передаче усилия одновременно участвует не более двух роликов.

На основе схемы (см. рис. 5) реализован опытный образец двухступенчатого редуктора для привода запорной арматуры. Здесь в качестве тел качения используются шарики диаметром 8 мм.

Быстроходная ступень выполнена в виде планетарного механизма

схемы К–Н–V с передаточным отношением 30. Модуль зубчатых колес – 1,5 мм. Во второй ступени применен планетарный механизм с промежуточными телами качения, реализующий передаточное отношение 11. Таким образом, общее передаточное отношение редуктора – 330. Ступени соединены крестовой муфтой. Использование шариков вместо роликов технологически удобнее, однако снижает долговечность передачи и целесообразно при небольших нагрузках.

Недостатком механизма с одноперiodным ведущим кулачком является то, что нагрузка со стороны тел качения на вал и, соответственно, на подшипники передается с одной стороны. В гораздо лучших условиях работает механизм с двумя оппозитными эксцентриками. Теоретически число нагруженных тел качения оказывается в два раза больше, чем в механизме с одним эксцентриком. Здесь число зубьев кулачка может быть только четным, т. к. в двой-

ном эксцентрикe рабочие поверхности расположены оппозитно. Оппозитно должны располагаться и зубья кулачка – впадина напротив впадины. Число тел качения при этом может быть только четным, в противном случае передача заклинит.

В каждой из двух зон контакта тел качения и зубьев кулачка угловые шаги зубьев и прорезей сепаратора, как и в рассмотренной выше однопериодной передаче, должны различаться на минимально возможную величину, которая, как разность между двумя четными числами, должна быть равна 2. Из этого следует, что в двухпериодной передаче число тел качения может быть больше или меньше числа зубьев кулачка на 2.

В двухпериодном кулачке в передаче усилия участвуют тела качения, расположенные оппозитно по отношению к эксцентрику, и суммарные нагрузки, действующие на эксцентрик со стороны тел качения, уравниваются на самом эксцентрикe. Это является важным достоинством двухпериодного кулачка, т. к. подшипник эксцентрика, обычно являющийся наименее долговечным элементом передачи, разгружен от радиальных усилий и позволяет создать конструкцию с плавающим эксцентриком.

Иногда ссылаются на аналогию передачи с промежуточными телами

качения радиального типа и подшипника качения, однако в отличие от подшипника в таких передачах качение сопровождается значительным скольжением, т. к. длина беговой дорожки на поверхности зуба в несколько раз меньше длины беговой дорожки на эксцентрикe. Аналогичное явление имеет место и на сепараторе в паре ролик–сепаратор. При повороте эксцентрика на 360° ролик делает несколько оборотов и, следовательно, должен скользить по поверхности радиального паза сепаратора.

Преимущество передачи с промежуточными телами качения по сравнению с известными планетарными передачами состоит в ее высокой перегрузочной способности, а также в отсутствии достаточно сложного устройства в виде механизма W. Форма рабочих элементов, кривизна поверхностей, минимизация изгибных напряжений на зубьях благоприятно отражаются на прочности передачи. Из всех элементов наиболее слабым является сепаратор – это ограничивает габариты и передаточное отношение передачи. Проблематичной является и динамика передачи при большой скорости движения тел качения. Передачу целесообразно использовать в тихоходной ступени высоконагруженного двухступенчатого планетарного механизма при сравнительно небольшом передаточном отношении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lehmann, M.** Sinoiden – Getriebe / M. Lehmann // Konstruktion. – 1981. – № 3. – S. 102–112.
2. **Становский, В. В.** Передачи со свободными телами качения, обзор патентной литературы / В. В. Становский, Т. А. Ремнева, С. М. Казакавичус // Прогрессивные зубчатые передачи : сб. науч. тр. – Новоуральск : Изд-во НГТИ, 2003. – С. 61–94.
3. **Лустенков, М. Е.** Планетарные шариковые передачи цилиндрического типа : монография / М. Е. Лустенков, Д. М. Макаревич. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 123 с. : ил.
4. **Борисенко, Л. А.** К теории планетарных механизмов с промежуточными телами качения осевого типа / Л. А. Борисенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 2. – С. 5–12.
5. **Пашкевич, М. Ф.** Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко. – Минск : БелНИИНТИ, 1992. – 248 с. : ил.
6. **Пашкевич, А. М.** Методика проектирования планетарных радиально-плунжерных редукторов первого, второго и третьего классов на основе компьютерного моделирования работы зацеплений : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / А. М. Пашкевич. – Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2013. – 27 с.

7. **Борисенко, Л. А.** Малогабаритные передаточные механизмы для мехатронных устройств : монография / Л. А. Борисенко. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 187 с. : ил.

8. **Беляев, А. Е.** Механические передачи с шариковыми промежуточными телами / А. Е. Беляев. – Томск : Изд-во ТПУ, 1992. – 231 с.

Статья сдана в редакцию 20 мая 2015 года

Леонид Анатольевич Борисенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: +375-295-45-18-48.

Leonid Anatolyevich Borisenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
Phone: +375-295-45-18-48.

УДК 621.787

А. М. Довгалева

ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ МАГНИТНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО И КОМБИНИРОВАННОГО НАКАТЫВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

UDC 621.787

A. M. Dovgalev

TOOLS FOR MAGNETO-CENTRIFUGAL AND COMBINED ROLL FORMING OF SURFACES OF MACHINE COMPONENTS

Аннотация

Предложены новые способы формообразования поверхности деформирующими шарами во вращающемся магнитном поле инструмента, в том числе с дополнительным намагничиванием упрочняемого поверхностного слоя ферромагнитных деталей машин. Разработаны конструкции инструментов для магнитно-центробежного и комбинированного накатывания, содержащих магнитную систему на основе постоянных магнитов различной конфигурации.

Ключевые слова:

накатчик, деформирующие шары, магнитная система, магнитное поле, высокочастотные колебания, модифицированный поверхностный слой.

Abstract

The paper presents new methods of forming the surface by deforming balls in the rotating magnetic field of the tool, including additional magnetization of a hardenable surface layer of ferromagnetic machine components. Designs of tools for magneto-centrifugal and combined roll forming were developed, which contain a magnetic system based on permanent magnets of various configurations.

Key words:

roll burnisher, deforming balls, magnetic system, magnetic field, high-frequency vibrations, modified surface layer.

Введение

В большинстве случаев выход из строя механизмов технических систем связан с износом входящих в них ответственных деталей. В связи с этим повышение износостойкости поверхностей деталей машин является важной технологической задачей. Сегодня для ее решения сложно найти альтернативу методам поверхностного пластического деформирования (ППД), обеспечивающим качественные характеристики поверхностей деталей в широких пределах [1, 2]. Однако известные методы по-

верхностного пластического деформирования в той или иной мере исчерпали свои технологические возможности.

Постановка задачи

Важным направлением усовершенствования существующих методов ППД является использование энергии магнитного поля инструмента для обеспечения силового взаимодействия деформирующих элементов с упрочняемой поверхностью заготовки. Перспективной является также разработка нового класса инструментов, отличающихся

от известных наличием магнитной системы, предназначенной для сообщения деформирующим шарам рабочих колебательных движений и намагничивания поверхностного слоя упрочняемых ферромагнитных деталей [3].

Основная часть

К числу инновационных относится метод магнитно-центробежного накатывания, при котором процесс поверхностного пластического деформирования осуществляют деформирующими шарами, свободно установленными в кольцевой камере вращающегося инструмента, перемещаемого с подачей вдоль упрочняемой поверхности заготовки. Его отличие от известных методов состоит в том, что рабочие колебательные движения деформирующим шарам сообщают вращающимся магнитным полем инструмента с величиной индукции $0,1 \dots 0,8$ Тл. При этом вектор индукции магнитного поля располагают нормально плоскости вращения деформирующих шаров [4].

Для реализации метода магнитно-центробежного накатывания разработаны конструкции инструментов, каждая

из которых имеет особенности и свою область технологического применения.

Анализ разработанных конструкций инструментов для магнитно-центробежного накатывания показывает, что они включают следующие основные элементы: цилиндрическую оправку 1 из немагнитопроводного материала; деформирующие шары 2; магнитную систему, состоящую из источников магнитного поля, например из двух кольцевых постоянных магнитов 3 осевой намагниченности и магнитопроводных дисков 4, 5, установленных соосно цилиндрической оправке 1. Магнитопроводные диски 4, 5 образуют открытую кольцевую камеру 6, в которой свободно установлены деформирующие шары 2. Кольцевые постоянные магниты 3 взаимодействуют с торцами магнитопроводных дисков 4, 5. Силовые линии магнитного поля от кольцевых постоянных магнитов 3 через магнитопроводные диски 4, 5 замыкаются на деформирующие шары 2. В результате магнитное поле распределяется вдоль кольцевой камеры 6 неравномерно, концентрируясь в зоне расположения деформирующих шаров 2 (рис. 1) [5].

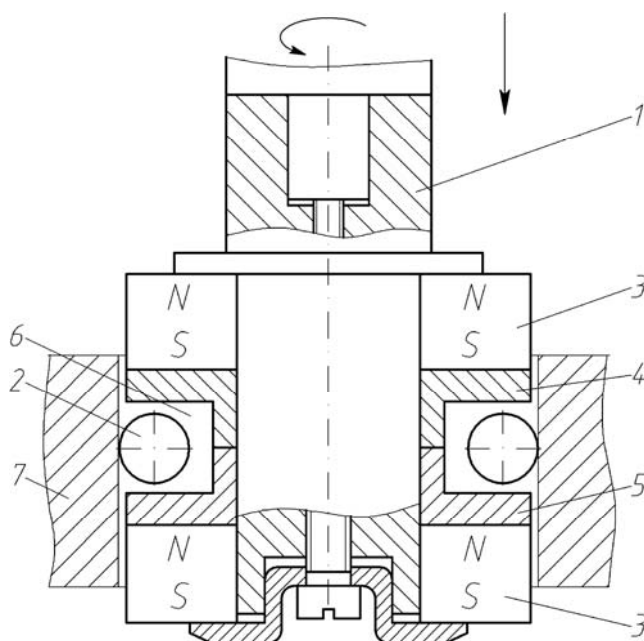


Рис. 1. Конструкция магнитно-центробежного накатника

Цилиндрическую оправку 1 инструмента закрепляют в шпинделе станка и вводят в полость отверстия обрабатываемой заготовки 7. Инструменту сообщают вращение и перемещают с подачей вдоль упрочняемой поверхности. Вращающееся магнитное поле перемещает деформирующие шары 2 по кольцевой камере 6 инструмента. Возникающая при этом центробежная сила прижимает деформирующие шары 2 к обрабатываемой поверхности заготовки 7. Одновременно на деформирующие шары 2 действует магнитная сила, имеющая постоянную и динамическую составляющие. Наличие динамической составляющей магнитной силы обусловлено магнитным трением деформирующих шаров 2 при пересечении силовых линий магнитного поля, а также периодическим перераспределением магнитного потока в зоне кольцевой камеры 6 инструмента, вызываемым колебательными перемещениями деформирующих шаров 2. Под действием динамической составляющей магнитной силы деформирующие шары приобретают высокочастотные колеба-

ния, интенсифицирующие процесс поверхностного пластического деформирования заготовки.

Конструкции инструментов

Отличительной особенностью инструментов для магнитно-центробежного накатывания является наличие магнитной системы, обеспечивающей сообщение деформирующим шарам рабочих движений. Конструкция магнитной системы инструмента проектируется с учетом требуемых характеристик качества упрочняемой поверхности, необходимых параметров динамического воздействия деформирующих шаров на поверхность заготовки, вида имеющихся в наличии источников магнитного поля, а также размера обрабатываемого отверстия.

Наиболее простую конструкцию магнитной системы имеет инструмент, в котором в качестве источника магнитного поля используется кольцевой постоянный магнит осевой намагниченности, представленный на рис. 2 [6].

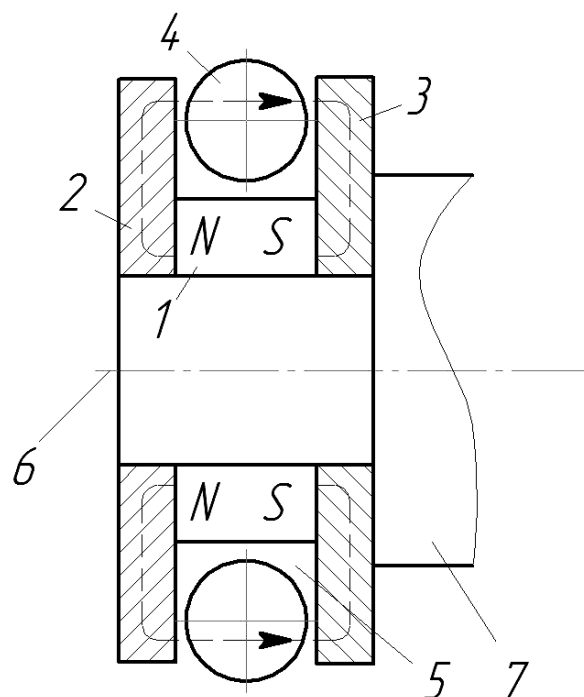


Рис. 2. Конструкция инструмента с магнитной системой на основе кольцевого постоянного магнита

В состав магнитной системы инструмента входят кольцевой постоянный магнит 1 осевой намагниченности, магнитопроводные диски 2, 3 и деформирующие шары 4. Магнитопроводные диски 2, 3 образуют кольцевую камеру 5. Деформирующие шары 4 свободно установлены в кольцевой камере 5 и имеют возможность вращения вокруг продольной оси 6 инструмента. Элементы магнитной системы соосно закреплены на оправке 7, выполненной из немагнитопроводного материала. Силовые линии магнитного поля замыкаются на магнитопроводные диски 2, 3 и деформирующие шары 4. В процессе обработки при вращении оправки 7 деформирующие шары 4 под действием вращающегося магнитного поля переме-

щаются по окружности, прижимаются центробежной силой к упрочняемой поверхности детали и осуществляют ее поверхностное пластическое деформирование.

Однако в рассматриваемой магнитной системе кольцевой постоянный магнит расположен в нижней части кольцевой камеры, что существенно увеличивает габаритные размеры инструмента.

Представленная ниже конструкция инструмента не имеет указанного недостатка, т. к. магнитная система содержит кольцевой постоянный магнит осевой намагниченности, расположенный за пределами кольцевой камеры (рис. 3) [7].

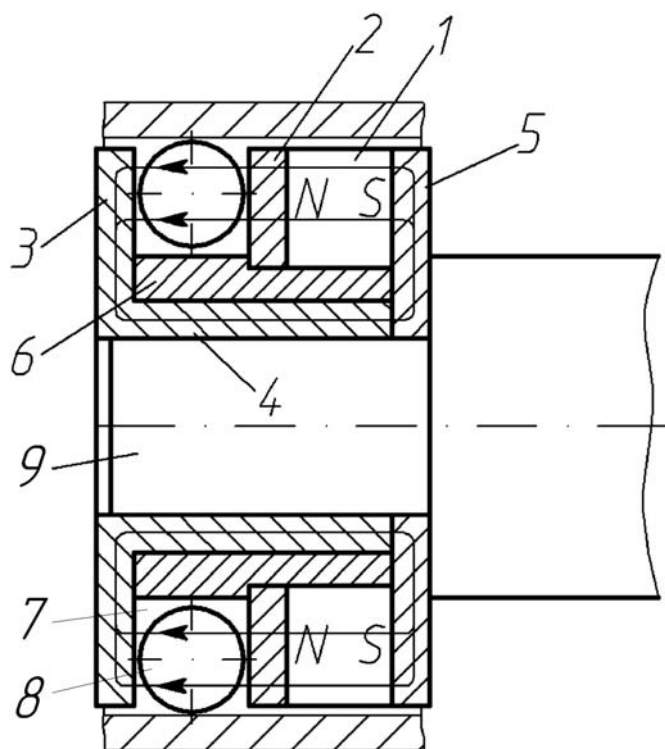


Рис. 3. Конструкция инструмента с расположением источника магнитного поля за пределами кольцевой камеры

Магнитная система инструмента содержит кольцевой постоянный магнит 1 осевой намагниченности, диск 2, стакан с фланцем 3 и цилиндрической

поверхностью 4, шайбу 5, втулку 6. Стакан с фланцем 3 и цилиндрической поверхностью 4, диск 2 и шайба 5 выполнены из магнитопроводного материала, а

штулка 6 – из немагнитопроводного. Фланец 3 и диск 2 образуют кольцевую камеру 7, в которой свободно установлены деформирующие шары 8. Магнитная система закреплена на немагнитопроводной оправке 9.

Силовые линии магнитного поля от кольцевого постоянного магнита 1 проходят через шайбу 5, цилиндрическую поверхность 4, фланец 3 стакана и замыкаются на деформирующие шары 8. В результате магнитное поле фокусируется в кольцевой камере 7 инструмента в зоне расположения деформирующих шаров 8, что повышает эффективность работы инструмента.

Особенностью работы инструментов, показанных на рис. 1...3, является «проскальзывание» деформирующих шаров относительно вращающейся магнитной системы. Вследствие этого частота вращения деформирующих шаров существенно отличается от скорости вращения оправки инструмента, что снижает производительность процесса упрочняющей обработки.

Для обеспечения согласования частот вращения деформирующих шаров и оправки инструмента разработана магнитная система с концентраторами магнитного поля, расположенными внутри кольцевой камеры (рис. 4) [8].

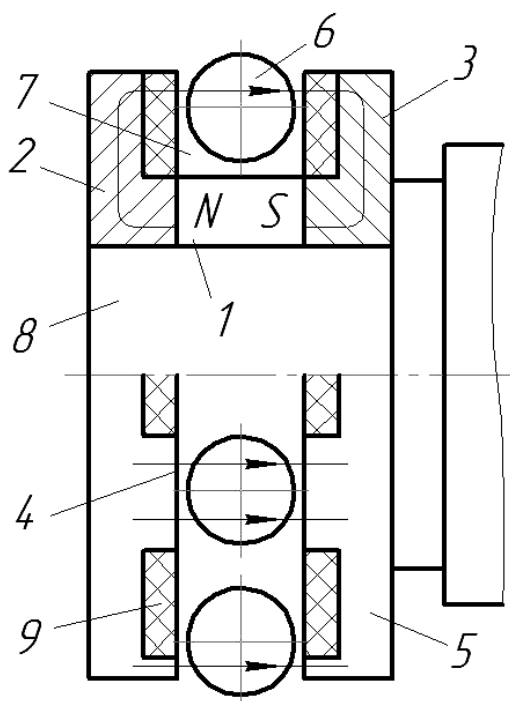


Рис. 4. Конструкция инструмента с магнитной системой, содержащей концентраторы магнитного поля

Основными элементами магнитной системы являются кольцевой постоянный магнит 1 осевой намагниченности, магнитопроводные диски 2, 3 с концентраторами магнитного поля в виде торцовых зубьев 4, 5, деформирующие шары 6. Магнитопроводные диски 2, 3 образуют кольцевую камеру 7, в которой

свободно расположены деформирующие шары 6. Кольцевой постоянный магнит 1 и магнитопроводные диски 2, 3 установлены соосно на оправке 8. Впадины торцовых зубьев 4, 5 заполнены заподлицо износостойкими пластмассовыми вкладышами 9. Оправка 8 изготовлена из немагнитопроводного мате-

риала.

Линии индукции магнитного поля от кольцевого постоянного магнита 1 посредством магнитопроводных дисков 2, 3 концентрируются на торцовых зубьях 4, 5, расположенных в зоне кольцевой камеры 7 с равномерным угловым шагом. Количество деформирующих шаров 6 принимают равным числу пар торцовых зубьев 4, 5 магнитопроводов. Деформирующие шары 6 располагаются в зоне торцовых зубьев 4, 5 магнитопроводных дисков 2, 3, что обеспечивает высокую жесткость связи деформирующих шаров 6 с магнитной системой инструмента. Деформирующие шары 6 в процессе обработ-

ки синхронно вращаются с оправкой 8 инструмента, что повышает эффективность процесса отделочно-упрочняющей обработки.

К недостаткам инструментов, имеющих магнитную систему на основе кольцевых постоянных магнитов, следует отнести то, что для конкретного диаметра обрабатываемого отверстия заготовки требуются определенные размеры источника магнитного поля.

На рис. 5 изображена конструкция инструмента, содержащего магнитную систему на основе цилиндрических постоянных магнитов, проектируемую по модульному принципу под любой диаметр обрабатываемого отверстия [9].

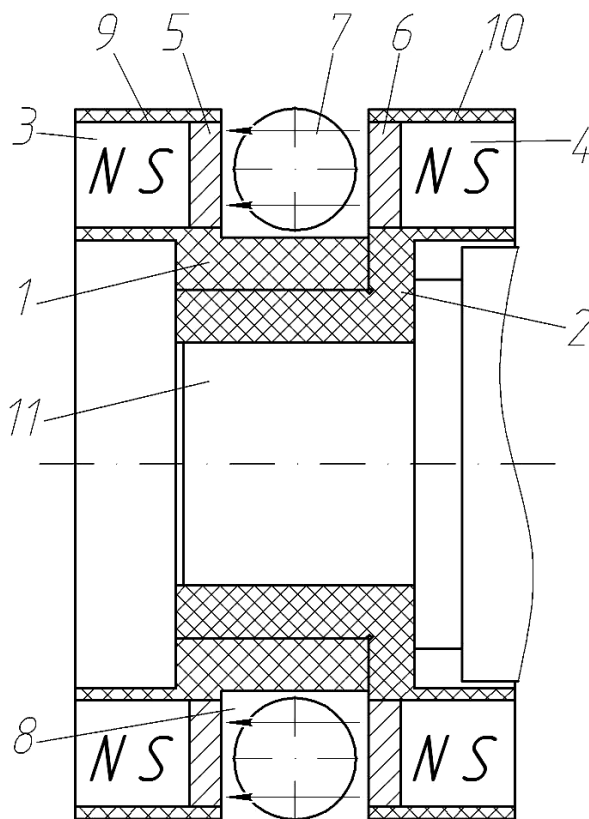


Рис. 5. Конструкция инструмента с магнитной системой на основе цилиндрических постоянных магнитов

Магнитная система включает диски 1, 2, цилиндрические постоянные магниты 3, 4, цилиндрические магнитопроводы 5, 6, деформирующие шары 7.

Диски 1, 2 образуют кольцевую камеру 8, в которой свободно расположены деформирующие шары 7. Цилиндрические постоянные магниты 3, 4 и магни-

топроводы 5, 6 установлены в аксиальных отверстиях 9, 10 дисков 1, 2 с равномерным угловым шагом. Количество цилиндрических магнитов в каждом из дисков 1, 2 соответствует числу деформирующих шаров 7, размещенных в кольцевой камере 8. Цилиндрические постоянные магниты 3, 4 расположены друг к другу противоположными полюсами. Диски 1, 2 и оправка 11 соединены между собой и выполнены из немагнитопроводного материала.

Наличие индивидуальных источников магнитного поля обеспечивает деформирующим шарам 7 в процессе упрочнения перемещение вдоль кольцевой камеры 8 и вращение вокруг оси, проходящей через геометрические центры магнитов 3, 4.

Следует отметить, что при осуществлении процесса магнитно-центробежного накатывания поверхности отверстия заготовок магнитное поле инструмента выполняет только лишь транспортную функцию – сообщает деформирующим шарам окружное вращение вокруг продольной оси инструмента и высокочастотные колебательные движения, интенсифицирующие процесс поверхностного пластического деформирования.

Усовершенствованием магнитно-центробежного накатывания является комбинированный метод упрочнения, при котором магнитное поле инструмента выполняет как транспортную, так и технологическую функцию. Согласно комбинированному методу магнитно-центробежного накатывания процесс пластического деформирования поверхности отверстия осуществляют деформирующими шарами, установленными в кольцевой камере, рабочее колебательное движение которым сообщают за счет энергии магнитного поля инструмента. Новизна метода заключается в том, что на упрочняемый поверхностный слой ферромагнитной заготовки дополнительно воздействуют вращающимся магнитным полем инструмента с индукцией $0,01 \dots 1,20$ Тл [10].

Инструмент для комбинированного магнитно-центробежного накатывания содержит оправку 1, шайбу 2, винт 3, деформирующие шары 4, источник магнитного поля 5, кольцевые магнитопроводы 6, 7, обойму 8. В качестве источника магнитного поля используют цилиндрические, кольцевые или пластинчатые постоянные магниты. Оправка 1, шайба 2 и обойма 8 изготовлены из немагнитопроводного материала (рис. 6).

Оправку 1 инструмента закрепляют в шпинделе станка. Вводят инструмент в обрабатываемое отверстие неподвижно закрепленной ферромагнитной детали и совмещают их продольные оси. Магнитный поток от кольцевого постоянного магнита 5 проходит через кольцевые магнитопроводы 6 и 7, а затем замыкается на деформирующие шары 4 и поверхность отверстия ферромагнитной детали (на рис. 6 силовые линии магнитного поля от кольцевого постоянного магнита 5 условно изображены тонкими линиями). В результате деформирующие шары 4 находятся в магнитном поле инструмента. Одновременно намагничивается и поверхность отверстия детали. Оправке 1 инструмента сообщают вращение, а детали – движение подачи.

Под действием вращающегося магнитного поля деформирующие шары 4 перемещаются вдоль кольцевой камеры инструмента. Возникающая при этом центробежная сила прижимает их к поверхности отверстия. В результате деформирующие шары 4 осуществляют поверхностное пластическое деформирование детали. Одновременно поверхность детали намагничивается вращающимся магнитным полем инструмента. При этом магнитное поле разогревает неоднородный слой материала по границам кристаллических зерен деформируемого металла. Это способствует дроблению зерен упрочняемого металла деформирующими шарами, размножению дислокаций и уменьшению сил сопротивления деформированию.

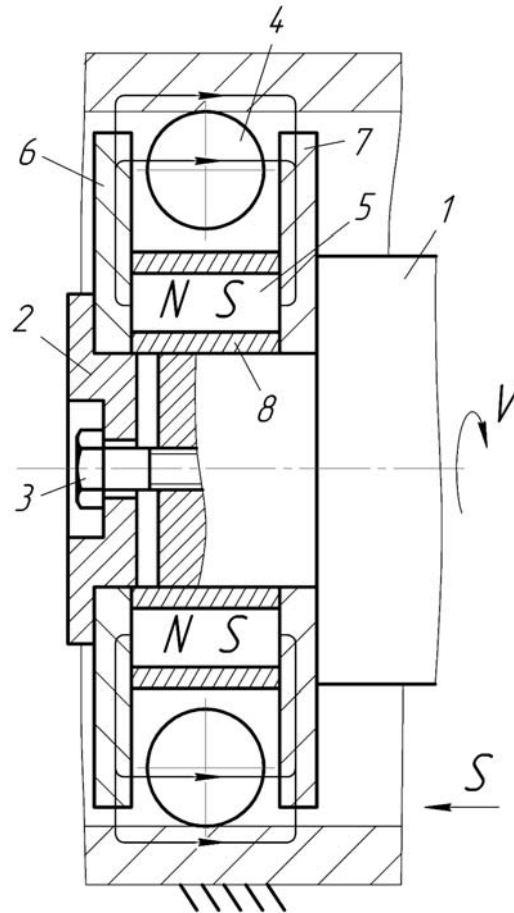


Рис. 6. Схема реализации комбинированного магнитно-центробежного накатывания

Таким образом, для осуществления комбинированного магнитно-центробежного накатывания инструментами, представленными на рис. 1...4, необходимо обеспечить зазор (в пределах 0,1...2,5 мм) между упрочняемой поверхностью детали и цилиндрическими магнитопроводами. Имеющийся зазор вызывает замыкание силовых линий магнитного поля, создаваемого магнитной системой инструмента как на деформирующие шары, так и на поверхность ферромагнитной упрочняемой детали. Указанную особенность следует учитывать при выборе характеристик магнитной системы проектируемого инструмента.

Для усиления магнитного воздействия на деталь в конструкции инструмента предусматривают дополнительную магнитную систему, обеспечивающую замыкание силовых линий магнитного поля непосредственно на поверхность ферромагнитной детали. Такая магнитная система содержит кольцевые магнитопроводы 9, 10, источники магнитного поля 11, 12 и держатели 13, 14 (рис. 7).

Совмещение во времени процессов силового и магнитного воздействий позволяет сформировать на детали модифицированный поверхностный слой, имеющий высокие эксплуатационные свойства.

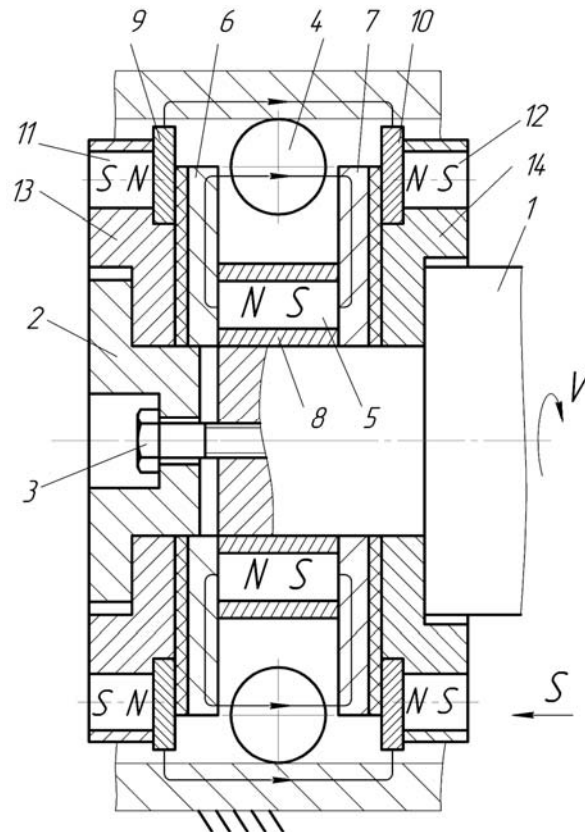


Рис. 7. Схема реализации комбинированного магнитно-центробежного накатывания с дополнительным намагничиванием поверхности детали

Заключение

В работе раскрыта сущность инновационных методов упрочнения – магнитно-центробежного и комбинированного накатывания, при которых воздействие деформирующих шаров на поверхность ферромагнитной детали осуществляется за счет энергии магнитного поля инструмента. Представлены конструкции инструментов, содержащих магнитную систему на основе постоянных магнитов, обеспечивающую намагничивание поверхностного слоя детали

и сообщение деформирующим шарам рабочих колебательных движений. Указаны особенности магнитных систем инструментов, спроектированных на основе постоянных магнитов различной конфигурации. Имеющиеся в статье сведения позволяют технологам выбрать наиболее приемлемую конструкцию инструмента для решения технологических задач по повышению эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. **Миранович, А. В.** Обработка заготовок деталей машин : учеб. пособие / А. В. Миранович, Д. Л. Кожуро, Ж. А. Мрочек ; под ред. Ж. А. Мрочека. – Минск : Выш. шк., 2014. – 172 с.
3. **Довгалец, А. М.** Классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2 – С. 30–38.

4. Способ и инструмент для магнитно-центробежного раскатывания внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали : пат. 18153 РБ, МПК В 24 В 39/02 / А. М. Довгалева, Д. М. Рыжанков ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № 20111513 ; заявл. 15.11.11 ; опубл. 30.06.13. – 6 с.

5. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. 15022 РБ, МПК В 24 В 39/02 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № 20091853 ; заявл. 23.12.09 ; опубл. 30.08.11. – 4 с.

6. Инструмент для упрочняющей обработки : пат. 2089372 РФ, МКИ 6 В 24 В 39/02, 39/00 / А. М. Довгалева (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалева (РБ). – № 4922931/02 ; заявл. 29.03.91 ; опубл. 10.09.97. – 5 с.

7. Раскатник с магнитоуправляемыми деформирующими элементами : пат. 11531 РБ, МПК В 24 В 39/00 / А. М. Довгалева, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № 20060637 ; заявл. 27.06.06 ; опубл. 28.02.08. – 4 с.

8. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки : пат. 11536 РБ, МПК В 24 В 39/00 / А. М. Довгалева, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № 20060760 ; заявл. 20.07.06 ; опубл. 28.02.08. – 4 с.

9. Инструмент для поверхностного пластического деформирования отверстия детали : пат. 18083 РБ, МПК В 24 В 39/02 / А. М. Довгалева, С. А. Сухоцкий, Д. М. Рыжанков, Д. М. Свирепа ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № 20111386 ; заявл. 20.10.11 ; опубл. 30.06.13. – 4 с.

10. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. 2068770 РФ, МКИ 6 В 24 В 39/02 / А. М. Довгалева (РБ) ; заявитель и патентообладатель А. М. Довгалева (РБ). – № 4922542/27 ; заявл. 29.03.91 ; опубл. 10.11.96. – № 31. – 7 с.

Статья сдана в редакцию 15 апреля 2015 года

Александр Михайлович Довгалева, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: ret@bru.by.

Aleksandr Mikhailovich Dovgalev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: ret@bru.by.

УДК 621.83.06

А. В. Капитонов, К. В. Сасковец, А. И. Касьянов, Д. В. Лешко, П. А. Фильченко

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
МАЛОГАБАРИТНЫХ РАДИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНЫХ РЕДУКТОРОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ САПР**

UDC 621.83.06

A. V. Kapitonov, K. V. Saskovets, A. I. Kasyanov, D. V. Leshko, P. A. Filchenko

**COMPUTER-AIDED DESIGN OF SMALL-SIZE RADIAL PLUNGER REDUCERS
USING ADVANCED CAD**

Аннотация

Приведены результаты автоматизированного проектирования конструкции малогабаритного планетарного радиально-плунжерного редуктора, компьютерные модели редуктора и его деталей, результаты моделирования его работоспособности, кинематики и динамики в САПР Siemens NX. Проведена оптимизация профиля многопериодной дорожки с целью устранения интерференции в зацеплении, уменьшения зазоров и повышения плавности работы передачи.

Ключевые слова:

планетарный радиально-плунжерный редуктор, компьютерные модели, моделирование кинематики и динамики передачи, оптимизация профиля многопериодной дорожки.

Abstract

The paper gives the results of the computer-aided design of a small-size planetary radial plunger reducer, the computer models of the reducer and its components, the results of simulating its performance, kinematics and dynamics in Siemens NX CAD. The optimization of the multi-period track profile was performed to eliminate interference in engagement, to reduce gaps and to enhance smooth transmission operation.

Key words:

planetary radial plunger reducer, computer models, simulation of kinematics and dynamics of transmission, optimization of multi-period track profile.

В современных машинах широко используются редуцирующие механизмы. Разработка инновационных технологий проектирования и создание новых конструкций механических передач является важнейшей научной и инженерной задачей. Современные механизмы все больше проектируют небольших размеров и массы, при этом их эксплуатационные характеристики не уступают более габаритным аналогам.

Исследуемые планетарные радиально-плунжерные передачи с промежуточными телами качения являются

малогабаритными. Они имеют небольшую массу и небольшие габаритные размеры по сравнению с зубчатыми передачами, большие передаточные отношения в одной ступени, соосность входного и выходного валов и др.

Построенные на основе этих передач редукторы применяются в ручных лебедках, станочных приспособлениях, приводе станка монтажа-демонтажа автомобильных шин, приводе перемещения технологических приспособлений для полива стадиона, как усилители мо-

ментов к гаечным ключам и машинным тискам [1]. Их также можно использовать в мехатронных устройствах, например, в приводах роботов.

Однако, несмотря на проведенные ранее исследования, существует ряд нерешенных задач при проектировании, изготовлении и контроле радиально-плунжерных передач. Конструкции таких передач мало изучены, и еще меньше изучены вопросы, связанные с точностью изготовления, методами контроля и оценкой их эксплуатационных характеристик.

Целью научной работы, результаты которой представлены в статье, являлась разработка и использование методики компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования конструкций малогабаритных радиально-плунжерных передач и оценка их работоспособности. С помощью компьютерного 3D-моделирования можно оп-

ределить недостатки конструкции редукторов на начальных этапах проектирования, исследовать их кинематику и динамику. Для данных целей при разработке моделей редукторов использовалась лицензионная САПР Siemens NX.

На рис. 1 показана 3D-модель разработанного редуктора, выполненная в NX8. Редуктор имеет две ступени. Передаточное отношение каждой ступени равно 11, передаточное отношение редуктора – 121. Редуктор состоит из вала ведущего 1, эксцентриков 2, установленных в каждой ступени, сепаратора первой ступени 3, двух центральных колес 4, фланца правого 5, кольца соединительного 6, сепаратора второй ступени 7, выполненного вместе с выходным валом, стакана подшипникового 8, фланца левого 9, кольца-компенсатора 10, втулки распорной 11, подшипников № 110 12, подшипников № 104 13.

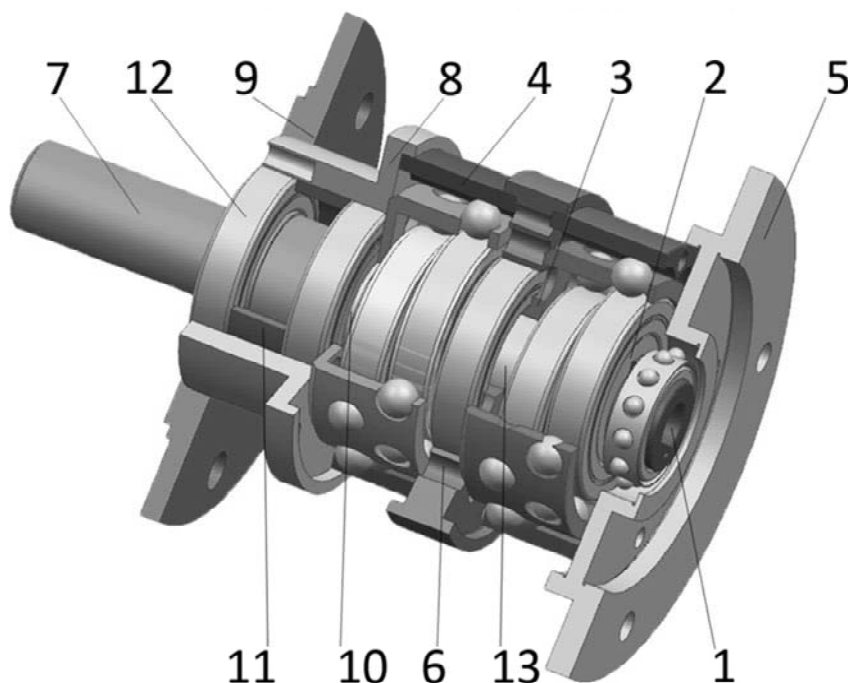


Рис. 1. 3D-модель двухступенчатого планетарного радиально-плунжерного редуктора

При вращении ведущего вала 1 эксцентрики, установленные на этом валу, воздействуют на шары-сателлиты, входящие в зацепление с многопериодными дорожками колес 4 и отверстиями сепараторов-водил 3 и 7. Количество шаров в каждом ряду на единицу больше, чем количество периодов дорожки колеса 4, поэтому за один оборот ведущего звена система шаров повернется

совместно с сепаратором 3 на один угловой период многопериодной дорожки колеса 4. При этом обеспечивается передаточное отношение одной ступени, равное одиннадцати [1].

В системе Siemens NX были разработаны модели основных деталей редуктора. На рис. 2 показаны 3D-модели деталей зацепления редуктора.

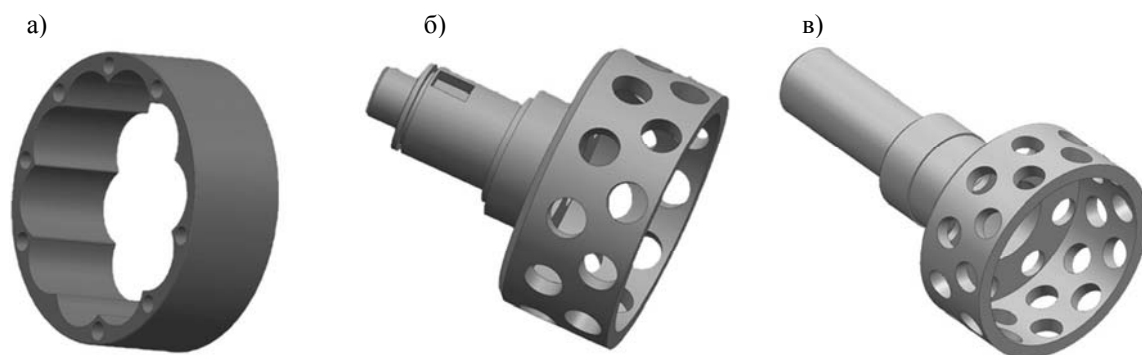


Рис. 2. 3D-модели деталей зацепления: а – центральное колесо с многопериодной дорожкой; б – сепаратор-водило первой ступени; в – сепаратор-водило второй ступени

Также были смоделированы другие детали редуктора, в том числе и унифицированные. В CAD-модуле программы NX получена модель сборки редуктора и проведена проверка сборки на наличие зазоров и интерференции деталей при моделировании вращения, т. к. пересечение компонентов приводит к заклиниванию узлов механизма при работе, а большие зазоры ухудшают кинематические и динамические характеристики передачи. Для обеспечения высокой точности сборки редуктора были установлены допустимые отклонения размеров на контактирующих поверхностях механизма.

На рис. 3 показана модель зацепления передачи.

Кинематический и динамический анализ в модуле программы Motion simulation подтвердил работоспособность механизма. При моделировании работы одной и двух ступеней передачи задавались угловая скорость входного

вала 6000 град/с (1000 об/мин), нагрузка на выходном валу, равная 10, 20 и 30 Н·м, передаточные отношения равные 11 и 121. При моделировании учитывались силы контакта деталей в зацеплении, силы трения, механические свойства материалов, жесткость деталей, объемные силы. В результате моделирования получены графики зависимостей угловых перемещений, угловых скоростей, угловых ускорений от времени при различных заданных условиях. Значения графиков, полученных моделированием, близки значениям, полученным расчетным путем [1, 2]. При этом колебания значений угловых скоростей и угловых ускорений за оборот выходного вала незначительны, что характеризует высокую плавность работы передачи без ударов.

Для обеспечения высокой работоспособности моделируемой передачи необходимо определить оптимальные геометрические параметры и форму

профиля многопериодной кривой, которая является осью перемещения фрезы при формообразовании дорожки центрального колеса [1–4]. Многопериод-

ная кривая описывается уравнением смещенной окружности, замкнутой на плоскости.

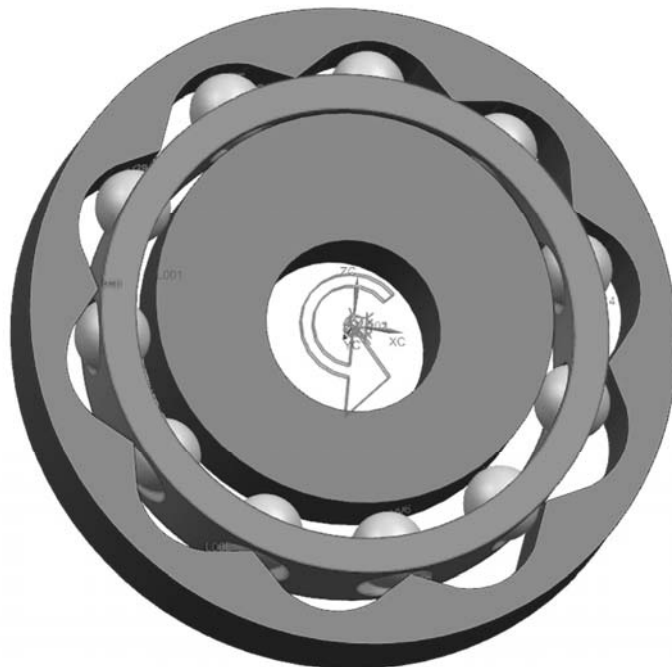


Рис. 3. 3D-модель зацепления передачи

Для оптимизации профиля дорожки использовался метод приближения замкнутой кривой путем последовательной замены кривых, полученных предыдущим моделированием. Сначала при построении профиля многопериодной дорожки центрального колеса и симуляции вращения звеньев передачи использовалась кривая, построенная по формуле смещенной окружности с числом периодов, равным 10. Так как форма кривой и профиля дорожки не позволила устранить зазоры всех шаров-сателлитов в зацеплении, то в программе задавалось условие, при котором шары были сопряжены с кулачком. Тем самым зазоры между шарами и ведущей дорожкой (кулачком) не оказывали значительного влияния на точность их перемещения. После симуляции вращения путем вывода графиков перемещения

шара-сателлита по координатам X и Y была построена кривая дорожки, замкнутая на плоскости (первое приближение). Затем для симуляции вращения использовались координаты точек перемещения этого шара, полученные в первом приближении. Повторяя замену кривых, полученных предыдущим моделированием, и описанные выше действия еще несколько раз, была смоделирована достаточно точная кривая, учитывающая особенности геометрии зацепления, которая использовалась при проведении конечной симуляции вращения редуктора под различными нагрузками.

Для построения многопериодной кривой замкнутой на плоскости была разработана программа в VBA Excel. На рис. 4 показан график полученной кривой, а на рис. 5 – код программы в ре-

даторе VBA. Алгоритм программы содержит массив значений радиус-векторов положений точек кривой, формулы расчета координат точек окружности X и Y в декартовой системе координат, смещенной на величину эксцентриситета, равную 3,75 мм, формулу

расчета радиус-векторов в полярной системе координат, вывод координат точек в таблицу Excel с шагом, равным числу периодов дорожки, – 10. Для изменения значений переменной использовался цикл со счетчиком, который реализуется оператором For.

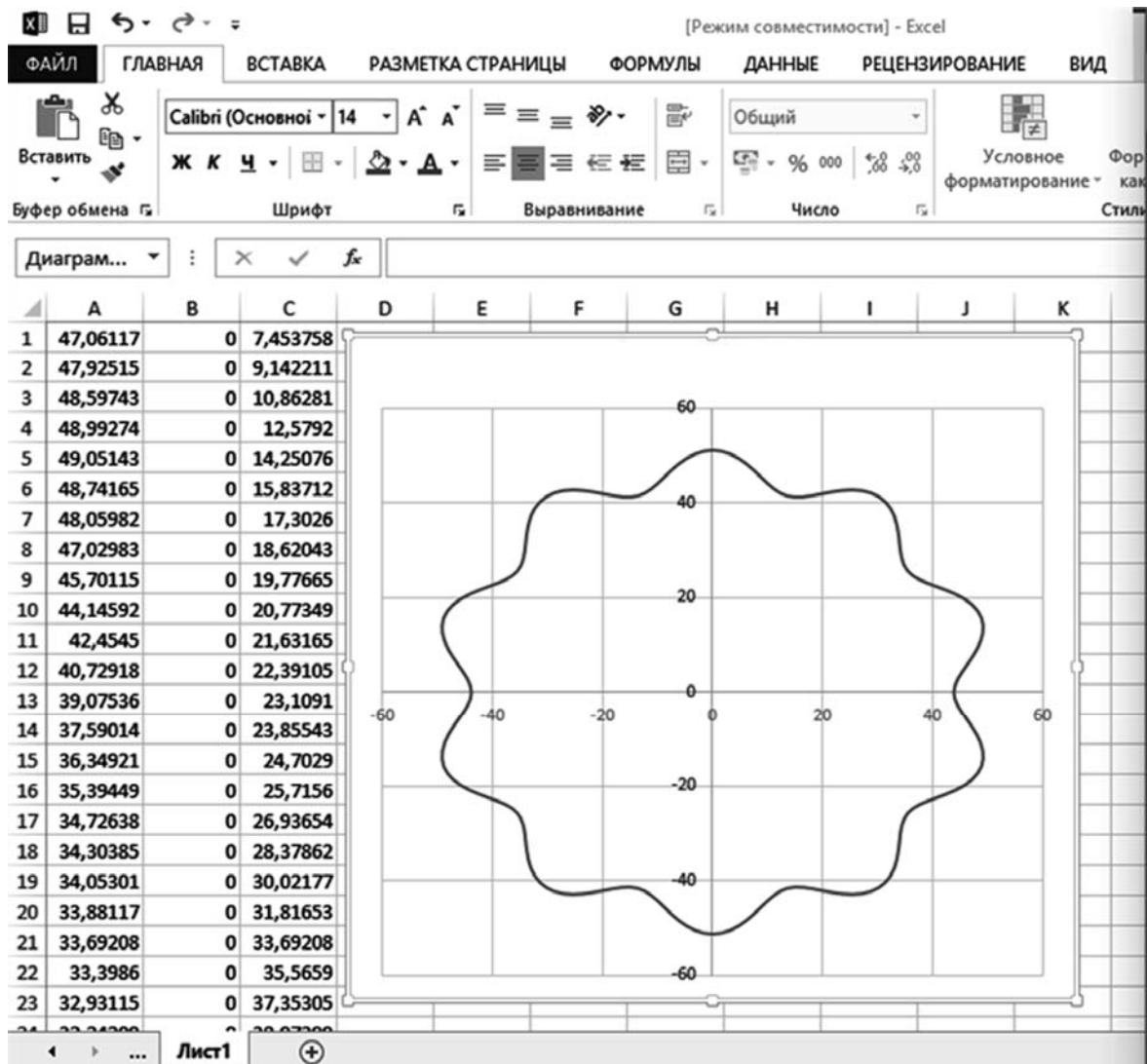


Рис. 4. График многопериодной кривой, замкнутой на плоскости

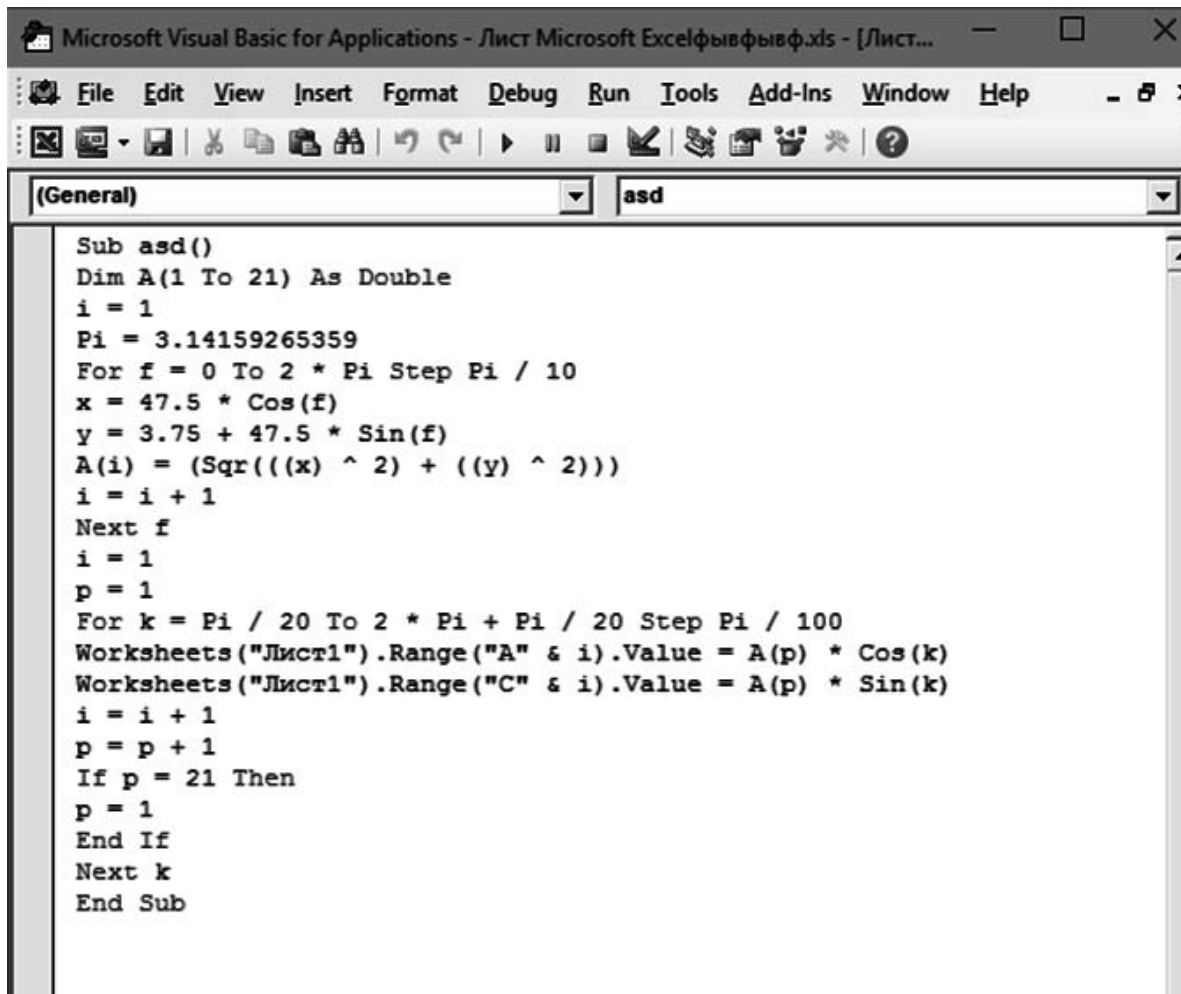


Рис. 5. Код программы в редакторе VBA для построения многопериодной кривой

Для построения профиля многопериодной дорожки необходимо построить многопериодную эквидистантную кривую на расстоянии, равном половине диаметра шарика-сателлита, – 7,5 мм. На рис. 6 показано окно программы NX, в котором отображена эквидистантная кривая. По полученной эквидистантной кривой построено центральное колесо редуктора с поверхностью многопериодной дорожки (рис. 7). Оптимизированный профиль дорожки позволил

улучшить кинематику и динамику передачи, повысить ее плавность работы, уменьшить колебания угловой скорости и углового ускорения.

Проверка модели редуктора на наличие интерференции и зазоров показала, что в зацеплении находится 7 шариков-сателлитов из 11, что позволяет повысить нагрузочную способность и плавность работы передачи и является высоким показателем усовершенствования ее конструкции.

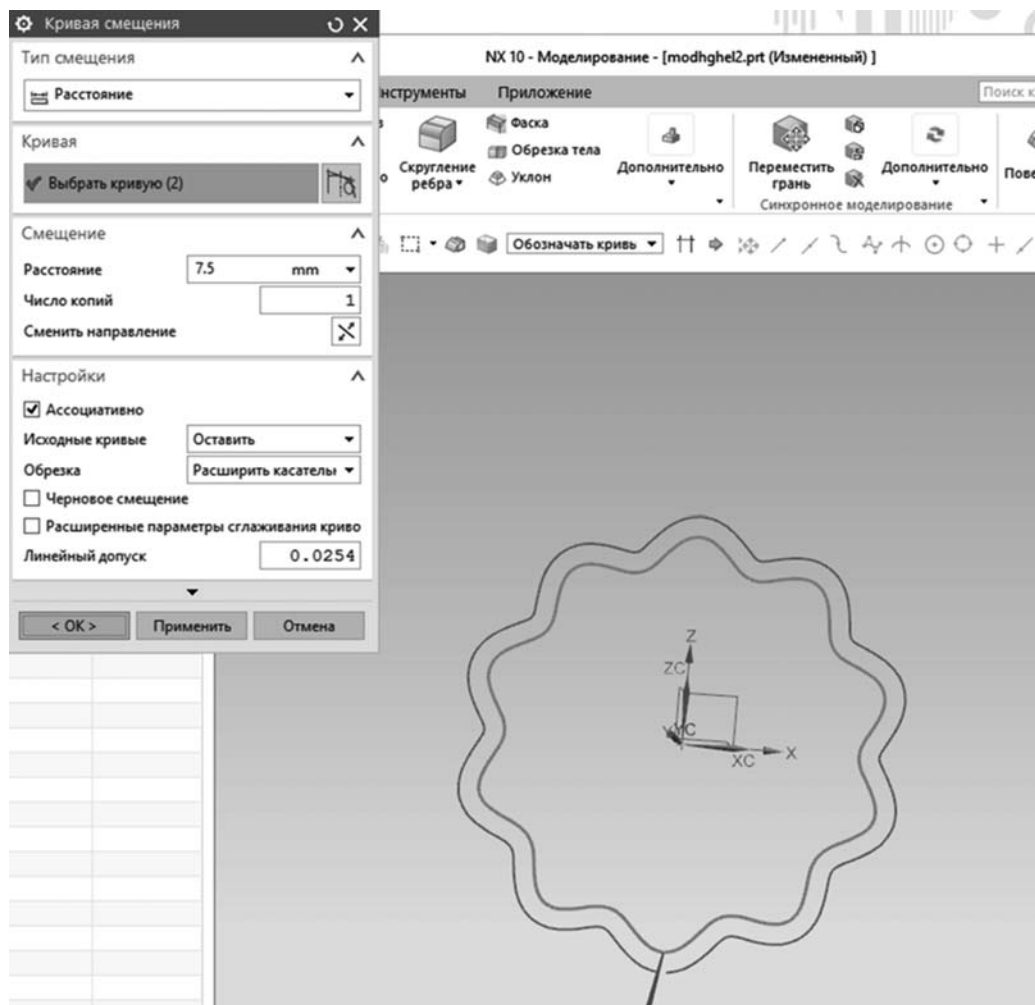


Рис. 6. Моделирование эквидистантной кривой

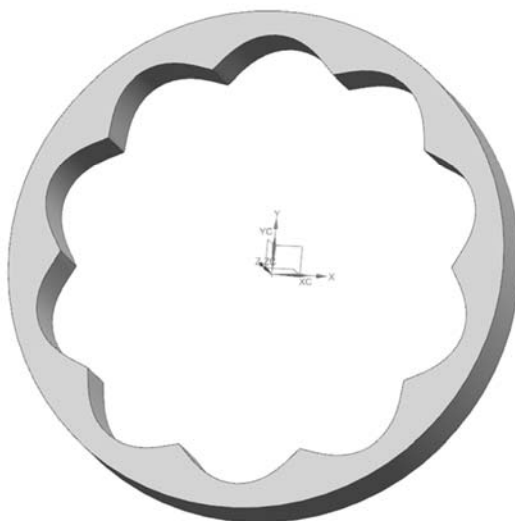


Рис. 7. Центральное колесо редуктора с оптимизированной поверхностью многопериодной дорожки

Выводы

Разработанная методика автоматизированного проектирования малогабаритных планетарных радиально-плунжерных передач на базе программного обеспечения САПР Siemens NX позволила создать компьютерные модели редуктора и его деталей, провести

моделирование кинематики и динамики передачи, оптимизацию профиля многопериодной дорожки с целью устранения интерференции в зацеплении, уменьшения зазоров и повышения нагрузочной способности и плавности работы передачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика / М. Ф. Пашкевич, В. М. Пашкевич, А. М. Пашкевич, С. В. Чертков. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.
2. **Пашкевич, М. Ф.** Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания / М. Ф. Пашкевич, В. В. Геращенко. – Минск : БелНИИНТИ, 1992. – 248 с.
3. Управление точностью планетарных роликовых передач на основе их моделирования и спектрального анализа кинематических погрешностей / М. Ф. Пашкевич, В. М. Пашкевич, В. В. Капитонов, А. М. Пашкевич // Изв. Белорус. акад. наук. – 2002. – № 1. – С. 45–52.
4. **Капитонов, А. В.** Методика оценки точности обработки периодических дорожек планетарных малогабаритных передач / А. В. Капитонов // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 1. – С. 60–64.

Статья сдана в редакцию 15 июня 2015 года

Александр Валентинович Капитонов, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-36-97-41.

Константин Валерьевич Сасковец, студент, Белорусско-Российский университет.

Артем Игоревич Касьянов, студент, Белорусско-Российский университет.

Павел Андреевич Фильченко, студент, Белорусско-Российский университет.

Денис Васильевич Лешко, студент, Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Valentinovich Kapitonov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-298-36-97-41.

Konstantin Valeryevich Saskovets, student, Belarusian-Russian University.

Artem Igorevich Kasyanov, student, Belarusian-Russian University.

Pavel Andreyevich Filchenko, student, Belarusian-Russian University.

Denis Vasilyevich Leshko, student, Belarusian-Russian University.

УДК 669.017

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

СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕРМОРЕАГИРУЮЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ «НИКЕЛЬ-АЛЮМИНИЙ-ОКСИД НИКЕЛЯ»

UDC 669.017

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

STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF GAS-THERMAL COATINGS FROM MECHANICALLY ALLOYED THERMO-REACTIVE COMPOSITE POWDERS OF THE «NICKEL-ALUMINUM-NICKEL OXIDE» SYSTEM

Аннотация

Приведены результаты исследований, направленных на создание механически легированных композиционных термореагирующих порошковых материалов системы Ni–Al–Ni₂O₃, обеспечивающих получение плазменных покрытий, отличающихся по сравнению с промышленно выпускаемыми аналогами увеличенной минимум в 1,5...2,4 раза прочностью сцепления с подложкой. Исследованы фазовый состав, структура и свойства порошковых материалов и плазменных покрытий из них.

Ключевые слова:

механическое легирование, порошки, плазменное напыление, термореагирующие материалы, покрытия, прочность сцепления.

Abstract

The paper gives the results of the studies aimed at producing mechanically alloyed composite thermo-reactive powder materials of the Ni–Al–Ni₂O₃ system, creating plasma coatings with the strength of adhesion to the substrate, which is, at the least, 1,5...2,4 times higher than that of industrially-produced analogs. The phase composition, the structure and the properties of powder materials and plasma coatings obtained from them were studied.

Key words:

mechanical alloying, powders, plasma spraying, thermo-reactive materials, coatings, adhesion strength.

Введение

Нанесение покрытий газотермическими способами напыления является перспективным направлением повышения ресурса работы оборудования во многих отраслях народного хозяйства. В первую очередь это относится к ответственным деталям, рабочая поверхность которых должна обладать высокой твердостью и износостойкостью [1].

В большинстве случаев упрочнению и восстановлению подвергаются стальные детали. Одним из обязательных условий, обеспечивающих формирование качественных покрытий с приведенными свойствами, является их хорошая сцепляемость с основой. При этом следует отметить, что с увеличением твердости прочность связи с основой, как правило, уменьшается [2]. Про-

блема решается применением промежуточного слоя, имеющего хорошую сцепляемость как с подложкой, так и с основным покрытием. Как правило, такими свойствами обладают материалы на основе алюминия, никеля, меди.

Для получения подслоя широкое распространение получили композиции систем Ni–Al, Ni–Cr, Ni–Ti, а также порошок молибдена [3, 4]. Данный выбор обусловлен их высокой стойкостью против окисления, небольшими внутренними напряжениями в образующемся покрытии, хорошей сцепляемостью с материалом основного слоя. Наибольшее распространение для нанесения подслоя получили порошковые материалы системы Ni–Al, количество второго компонента в которых может достигать 30 % [3]. Чаще используются порошки с содержанием 5...15 % алюминия [3, 5–7].

Во многом прочность сцепления подслоя с подложкой зависит от состояния частицы в момент соударения с поверхностью детали. Чем выше степень ее нагрева, тем более активно она взаимодействует с поверхностью и тем надежнее связь между покрытием и подложкой. В связи с этим наиболее перспективным направлением повышения прочности сцепления является применение композиционных терморегулирующих порошковых материалов [8]. По типу реализуемых реакций взаимодействия их подразделяют на две группы: экзотермические порошковые композиции на основе металлов (интерметаллидные) и термитные порошковые материалы.

Согласно данным [8], при взаимодействии компонентов в терморегулирующих материалах системы «никель–алюминий» количество выделяемой энергии обеспечивает поддержание высокой температуры частицы на дистанции до 300 мм. Однако на таком расстоянии происходит значительное окисление компонентов, и в первую очередь алюминия. Это приводит к ухудшению качества формируемого покрытия и

снижению адгезионной и когезионной прочности. Сокращение дистанции напыления до 50...150 мм не обеспечивает эффективного взаимодействия между компонентами, а это, в свою очередь, приводит к тому, что прочности сцепления покрытий из терморегулирующих и термонейтральных интерметаллидных порошков оказываются близкими по значению.

Исходя из вышесказанного, предпочтительным является использование материалов, в которых выделение тепловой энергии происходит за счет окислительно-восстановительных реакций. Такой тип взаимодействия отличается более высокой энтальпией и скоростью протекания превращений, завершающихся на дистанции не более 200 мм. В качестве восстановителя в этих системах наиболее перспективным является алюминий. Это обусловлено оптимальным сочетанием его термодинамических и физико-механических характеристик, положительно влияющих на свойства покрытий.

В большинстве случаев экзотермические композиционные порошки изготавливаются способами конгломерирования [9]. Однако существующие способы производства являются трудоемкими и низкопроизводительными. Наличие в их составе связующего ухудшает свойства формируемых покрытий. Они отличаются повышенной пористостью и неоднородностью структуры, что обусловлено неполным выгоранием компонентов связки и незвершенностью процесса взаимодействия между компонентами [10].

Перспективной технологией создания композиционных порошковых материалов данного типа является реакционное механическое легирование (РМЛ) [11–13]. РМЛ реализуется при обработке шихты в механореакторе. При этом имеют место многообразные эффекты: пластическая деформация, накопление дефектов кристаллического строения, разрушение и холодная сварка частиц по

ювенильным поверхностям, вызывающие протекание механически активируемых фазовых и структурных превращений и образование композиционных частиц. Механически легированные порошки являются композиционными неравновесными наноструктурными терморегулирующими однородными по химическому составу материалами. Они представляют собой плотные образования осколочной (близкой к сферической) формы и обладают высокими технологическими свойствами, обеспечивающими получение качественных газотермических покрытий.

Целью работы авторов являлось установление закономерностей формирования структуры, фазового состава и свойств газотермических покрытий из механически легированных терморегулирующих композиционных порошков системы «алюминий–никель–оксид никеля».

Методика проведения эксперимента

В качестве исходных материалов для получения механически легированных композиций служили стандартные порошки никеля – ПНК-ОТ2 (ГОСТ 9722-79); алюминия – ПА-4 (ГОСТ 6058-73); оксид никеля Ni_2O_3 марки «Ч». При проведении исследований учитывалось содержание кислорода в порошках никеля и алюминия, которое составляло примерно 0,15 и 0,10 % соответственно. Наличие других примесей во внимание не принималось.

Порошки получали механическим легированием шихты в четырехкамерном механореакторе – энергонапряженной вибрационной мельнице гирационного типа [14].

Переменными факторами служили состав шихты и продолжительность ее обработки. Параметром оптимизации являлась прочность плазменных покрытий. В качестве аналогов использованы покрытия, полученные из промышленно выпускаемых порошковых материалов: ПН85Ю15 (85 % Ni; 15 % Al) и

ПТ-НА-01 (95 % Ni; 5 % Al). Первый производится распылением расплава, второй – плакированием и является терморегулирующим.

В материалах Ni–Al– Ni_2O_3 количество Al составляло 10 %. Содержание оксида никеля Ni_2O_3 варьировалось в интервале 3,2...9,6 %. Количество вводимых легирующих компонентов обусловлено рядом технологических особенностей процесса получения порошковых материалов и их дальнейшего напыления.

При подготовке к напылению образцы подвергались пескоструйной обработке хромистым корундом F 20. Нанесение покрытий производили методом плазменного напыления плазмотроном оригинальной конструкции (аналог ПУН-1), работающим на воздушно-пропановой плазмообразующей смеси. Покрытия наносились на следующих режимах: сила тока – 210...220 А; напряжение на дуге – 190...200 В; соотношение воздух/пропан стехиометрическое; скорость плазмы (дозвуковая) – 1300...1500 м/с; скорость частиц – 80...100 м/с; расход порошка – 5...7 кг/ч. Дистанция напыления – 250 мм; диаметр подающей трубки – 2,0 мм.

Прочность плазменных покрытий определялась по штифтовой методике [15], заключающейся в совместном нанесении покрытия на образец и отделяемые элементы, вставленные в цилиндрические отверстия образца по скользящей посадке. Покрытия наносились на прямоугольные образцы из отожженной стали Ст 3 толщиной 5 мм. Диаметр отрываемого элемента – 2 мм.

Разрушение образцов с напыленным покрытием осуществлялось на установке, схема которой представлена на рис. 1. Образец 1 устанавливается на опорный держатель 7 и фиксируется сверху противовесом 2, обеспечивающим надежное прилегание образца к плоскости и предотвращающим его падение в момент отрыва элемента. После этого на нижней части отделяемого элемента 6 фиксируется механизм 3, пред-

ставляющий собой набор подвижных элементов и состоящий из зацепного устройства 8, фиксирующегося на отрываемом элементе, а также винта 9, уха 10 и крюка 11, выполняющих роль компенсаторов перекоса и служащих для фиксации цилиндра 4. Конструкция данного устройства позволяет исключить возникновение изгибающего момента на границе раздела элемент–покрытие, приводящего к преждевременному от-

рыву элемента и снижению точности измерения. Помимо этого, механизм предотвращает заклинивание отделяемого элемента в отверстии вследствие его перекоса, что также может привести к снижению точности результатов. Цилиндр 4 обеспечивает плавное нагружение образца со скоростью 20 г/с, заполняясь металлическим порошком, подающимся через воронку 5.

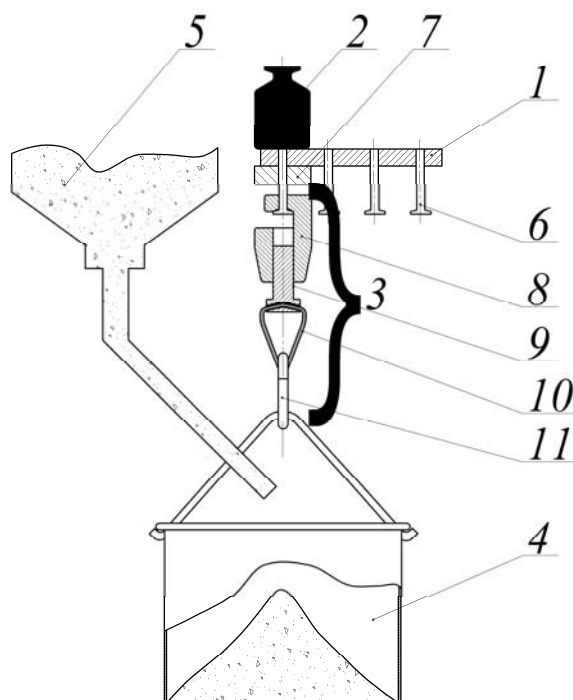


Рис. 1. Схема установки для исследования прочности сцепления газотермических покрытий с подложкой: 1 – образец с отрываемыми элементами; 2 – противовес; 3 – подвижный механизм; 4 – цилиндр; 5 – источник нагружения; 6 – отрываемый элемент; 7 – опорный держатель; 8 – зацепное устройство; 9 – винт; 10 – ухо; 11 – крюк

Гранулометрический, металлографический, электронно-микроскопический анализы порошков и покрытий проводились с использованием стандартных методик, приборов и оборудования.

Результаты исследований

Частицы (гранулы) композиционных механически легированных порошков формируются путем связывания и последующей гомогенизации продуктов разрушения исходных компонентов

и имеют осколочную форму (рис. 2). В зависимости от состава исходной шихты средний размер гранул находится в пределах 30...75 мкм. Как и порошковые материалы системы «никель–алюминий» [16], они характеризуются высокой плотностью с отдельными порами и трещинами. Микроструктура гранулированных композиций примерно одинакова. После обработки в течение более 5 ч они металлографически однородны – включения

легирующих компонентов, а также границы зерен не выявляются. Компози-

ция в целом гомогенна и имеет ультрадисперсное строение.

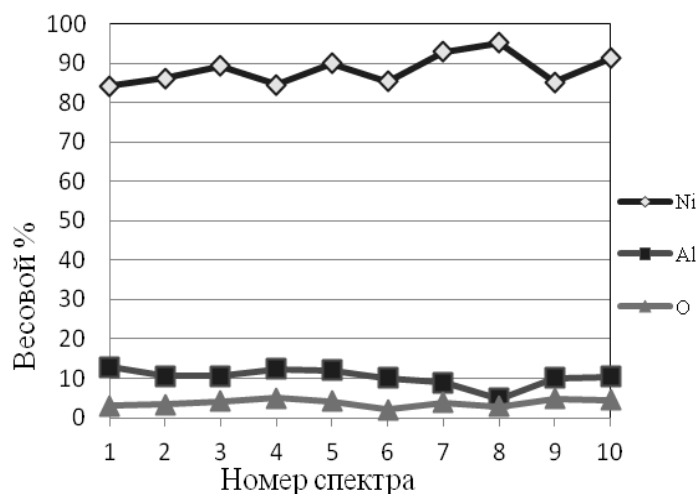
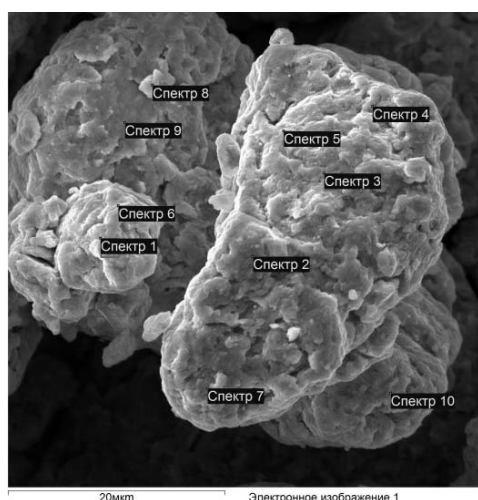


Рис. 2. Вид, структура частиц и распределение основных элементов механически легированной композиции Ni – 10 % Al – Ni₂O₃, обработанной в течение 8 ч (СЭМ)

Наряду со структурными изменениями, обработка шихты в механореакторе инициирует фазовые превращения, направленные на уменьшение свободной энергии системы. Однако завершения они не получают и фазовый состав композиций существенно отличается от равновесного. Полнота протекания механически активируемого взаимодействия между компонентами исследуемых систем не превышает 50 % [13, 17]. Теплосодержание исследованных композиций систем «Ni–Al–Ni₂O₃», подвергнутых обработке в механореакторе, обеспечивает увеличение температуры на 600...640 °C.

Механически легированные порошки находятся в активированном состоянии. Независимо от исходного состава шихты термически активируемое взаимодействие между компонентами механически легированной композиции, брикетированной холодным прессованием, начинается при температуре около 200 °C. В этих же системах, полученных смешиванием компонентов в «пьяной» бочке, температура начала процесса составляет 400 °C [18].

При механическом легировании, наряду с растворением алюминия в никеле, имеет место формирование наноразмерных включений алюминидов Ni₃Al и NiAl, а также оксидов алюминия, эффективно упрочняющих основу. Основным источником кислорода, необходимого для образования оксидов алюминия, является оксид никеля. В зависимости от его количества микротвердость композиций после механического легирования изменяется в интервале 415...520 HV. Отжиг при температуре 650 °C в течение 2 ч, приводящий к завершению фазовых превращений в композициях, увеличивает значение твердости до 540...645 HV.

Анализ результатов авторских исследований, приведенных в [11–13], показывает, что механически легированные порошки являются термореагирующими композиционными термодинамически неравновесными системами. Они имеют субмикроструктурный тип структуры основы, характеризующийся высокоразвитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированных наноразмерными включениями

механически синтезированных упрочняющих фаз, наследуемый материалами, получаемыми из них.

Влияние содержания оксида никеля в шихте и продолжительности механического легирования на свойства покрытий системы «никель–алюминий»

С целью обоснованного установления граничных значений факторов содержание оксида никеля в шихте изменялось в пределах 1...9,6 %, а продолжительность обработки ее в механореакторе – в интервале 4...12 ч. Согласно результатам исследований, приведенных на рис. 3, на прочность плаз-

менных покрытий из механически легированных порошков существенное влияние оказывает как первый, так и второй фактор.

Изменение прочности сцепления покрытий в зависимости от содержания оксида алюминия в порошке и времени обработки композиции описываются кривыми с максимумом. Увеличение содержания в композиции оксида никеля приводит к росту прочности сцепления с достижением максимального ее значения, равного (71 ± 4) Н/мм², при содержании Ni_2O_3 в количестве 6,4 %. Дальнейшее увеличение количества оксида никеля до 9,6 % приводит к снижению прочности до (53 ± 4) Н/мм².

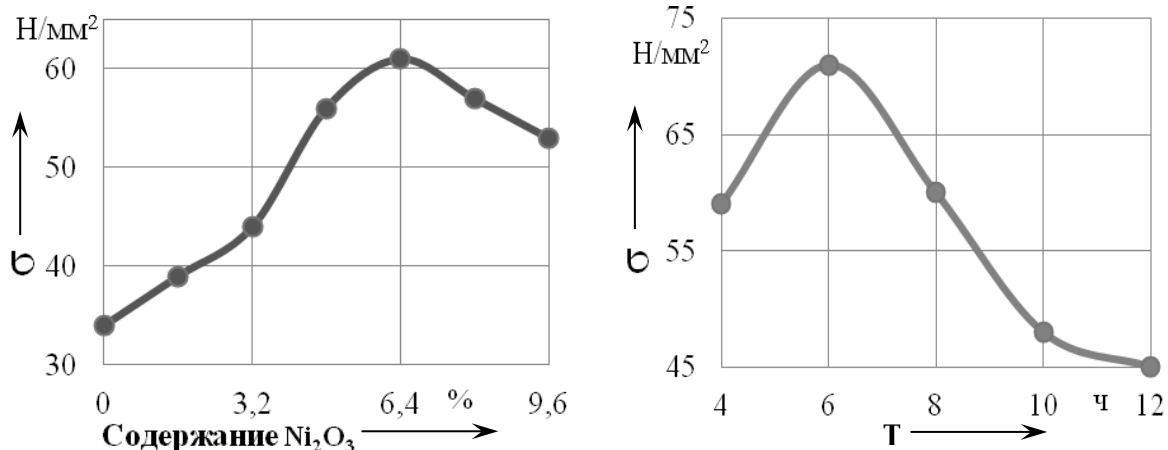


Рис. 3. Влияние количества Ni_2O_3 , вводимого в исходную шихту, (а) и времени ее обработки (б) на прочность сцепления формируемых газотермических покрытий системы «Ni–10 % Al– Ni_2O_3 »: а – 8 ч; б – 6,4 % Ni_2O_3

Аналогичная закономерность характерна для продолжительности обработки шихты в механореакторе. Максимальное значение прочности покрытие показывает при обработке в течение 6 ч, после чего в интервале 6...8 ч происходит ее значительное снижение, а при 12 ч обработки она падает более чем на 35 % – с 71 до 45 Н/мм². Данное явление можно объяснить интенсивным протеканием механически активируемых структурно-фазовых превращений [11–13].

Для установления совместного влияния состава шихты и времени обработки на свойства формируемых покрытий был реализован полнофакторный эксперимент с применением метода центрального ортогонального композиционного плана второго порядка.

По результатам статистической обработки экспериментальных данных получена математическая модель, адекватно представляющая результаты экспериментов.

Прочность сцепления газотермических покрытий

$$\sigma = 62 - 7x_2 - 16x_1^2,$$

где x_1 , x_2 – кодированные значения факторов, изменяющиеся в пределах от -1 до $+1$.

Перевод натуральных значений в кодированные осуществляется следующим образом:

$$x_1 = \frac{X_1 - 6,4}{3,2}; \quad x_2 = \frac{X_2 - 8}{2},$$

где X_1 – содержание легирующей добавки, $X_1 = 3,2 \dots 9,6$ %; X_2 – время обработки композиции, $X_2 = 6 \dots 10$ ч.

Графическая интерпретация модели, показывающая зависимость исследуемых параметров от переменных факторов, представлена на рис. 4.

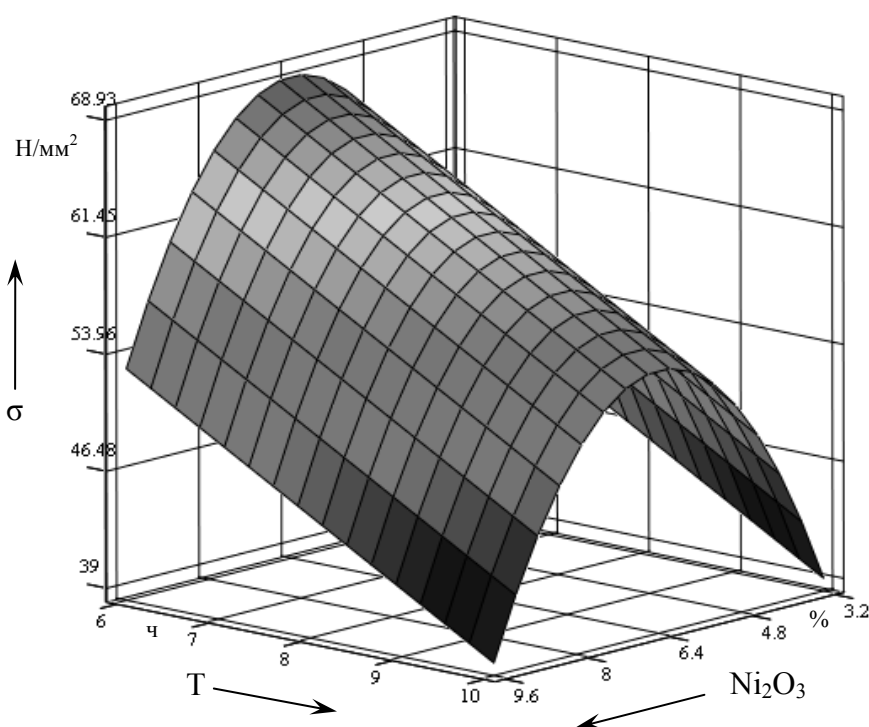


Рис. 4. Зависимость прочности сцепления покрытий системы «Ni–10 % Al–Ni₂O₃» от количества Ni₂O₃ в исходной шихте и времени ее обработки в механореакторе

Несмотря на некоторое падение прочности сцепления при увеличении количества вводимого Ni₂O₃ свыше 6,4 % и времени обработки шихты более 6 ч, покрытия из разработанных порошковых материалов системы «Ni–10 % Al–Ni₂O₃» по сравнению с покрытиями, полученными из композиций, не содержащих оксида никеля [16], имеют более высокое значение прочности сцепления и минимум в 1,5...2,4 раза превосходят по этому показателю покрытия из се-

рийно выпускаемых порошков (рис. 5).

Полученная зависимость для кривой 1 может быть объяснена структурными и фазовыми превращениями, протекающими в материале как в процессе обработки в механореакторе, так и при последующем нанесении покрытий. Помимо этого, на прочность могут оказывать влияние и режимы процесса напыления. Первоначальный рост прочности сцепления при введении оксида никеля может быть объяснен увеличе-

нием теплового эффекта в результате взаимодействия Ni_2O_3 и Al , что создает более благоприятные условия для разогрева и плавления частиц. Снижение прочности сцепления покрытий с увеличением количества оксида никеля более 6,4 % является результатом перегрева жидкой фазы, интенсифицирующим взаимодействие с кислородом окружающей среды, что приводит к уве-

личению количества оксидов в покрытии. Обладая высокой твердостью и температурой плавления, образующиеся оксиды препятствуют качественному растеканию капли, увеличивая неоднородность и пористость получаемого слоя. Это на определенном этапе оказывает негативное влияние на прочность сцепления формируемого слоя.

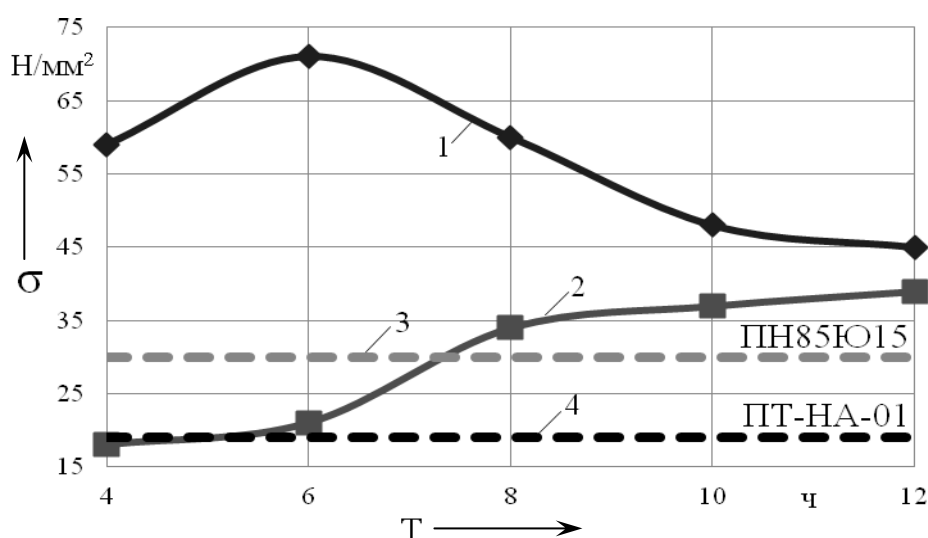
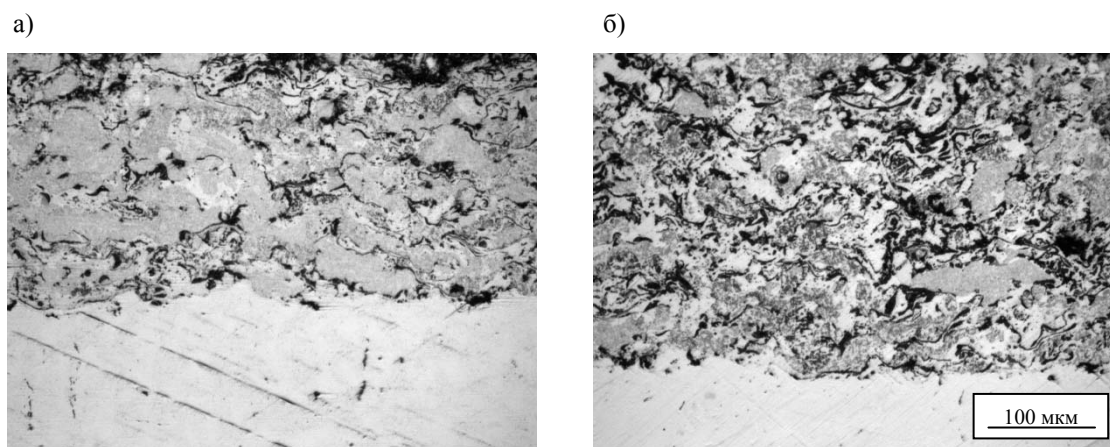


Рис. 5. Сравнительная прочность сцепления покрытий из разработанных порошковых материалов и серийно выпускаемых порошков: 1 – $\text{Ni-10 \% Al-Ni}_2\text{O}_3$; 2 – $\text{Ni-10 \% Al}$ [16]; 3 – ПН85Ю15; 4 – ПТ-НА-01

Данное предположение подтверждают металлографические исследования полученных плазменных покрытий.

Как видно из рис. 6, увеличение количества оксида никеля приводит к увеличению их пористости и неоднородности.



Время обработки – 8 ч

Рис. 6. Структура покрытий: а – $\text{Ni-0 \% Al-3,2 \% Ni}_2\text{O}_3$; б – $\text{Ni-10 \% Al-9,6 \% Ni}_2\text{O}_3$

Следует отметить, что при испытании покрытий из исследуемых композиций отслоение по зоне раздела покрытие–основа, как правило, не наблюдается. Таким образом, можно предположить, что прочность сцепления покрытия с подложкой значительно выше полученных значений, а ее величина ограничивается прочностью связей в самом слое.

Аналогично порошковым материалам, не содержащим в своем составе Ni_2O_3 , термическая обработка исследуемых композиций оказывает существенное влияние на величину прочности сцепления покрытий. Отжиг механически легированных порошков, проводившийся при температуре 670°C в течение 2 ч, полностью лишает их экзотермического эффекта, превращая из термореагирующих в термонейтральные. Это ведет к уменьшению прочности сцепления между напыляемыми частицами и, как следствие, к снижению величины удельной нагрузки, вызывающей его разрушение (рис. 7). Причем наиболее значимое падение прочности, составляющее более 65 %, характерно для состава $\text{Ni}-10\% \text{Al}-6,4\% \text{Ni}_2\text{O}_3$, обработанного в течение 6 ч, обеспечивающего в неотожженном состоянии максимальное значение сцепления.

В то же время видно (см. рис. 7), что прочность сцепления покрытий из отожженных порошковых материалов с увеличением времени обработки постепенно возрастает, что, вероятно, связано с увеличением плотности слоя.

С учетом превалирующего влияния на эксплуатационные свойства покрытий их прочностных свойств отжиг механически легированных порошков рассматриваемых композиций является нецелесообразным. Результаты исследований СЭМ и МРСА (рис. 8) приведены для нетермообработанных порошковых материалов.

Как видно из рис. 8, а, б, получаемые покрытия отличаются достаточно высокой плотностью и однородностью с равномерным распределением по площади включений темного цвета, являющихся в основном оксидом алюминия, на что указывают результаты МРСА (рис. 8, г, д).

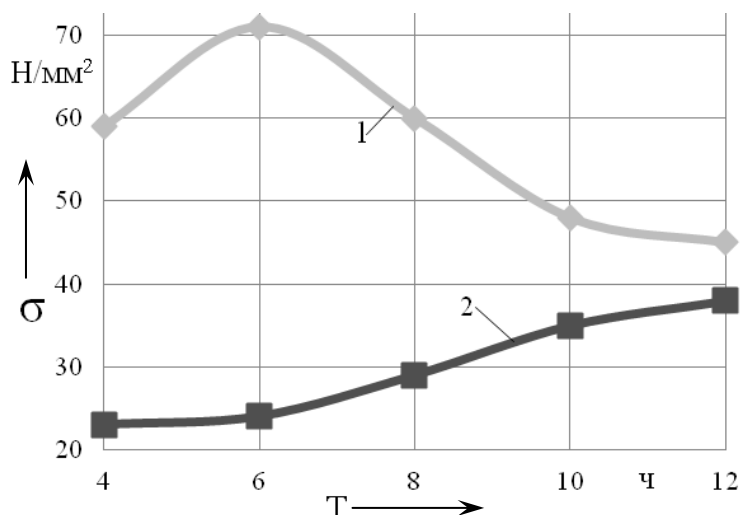


Рис. 7. Влияние термической обработки на прочность сцепления покрытий из порошков $\text{Ni}-10\% \text{Al}-6,4\% \text{Ni}_2\text{O}_3$, обработанных в течение 4...12 ч: 1 – неотожженные; 2 – отжиг при температуре 670°C

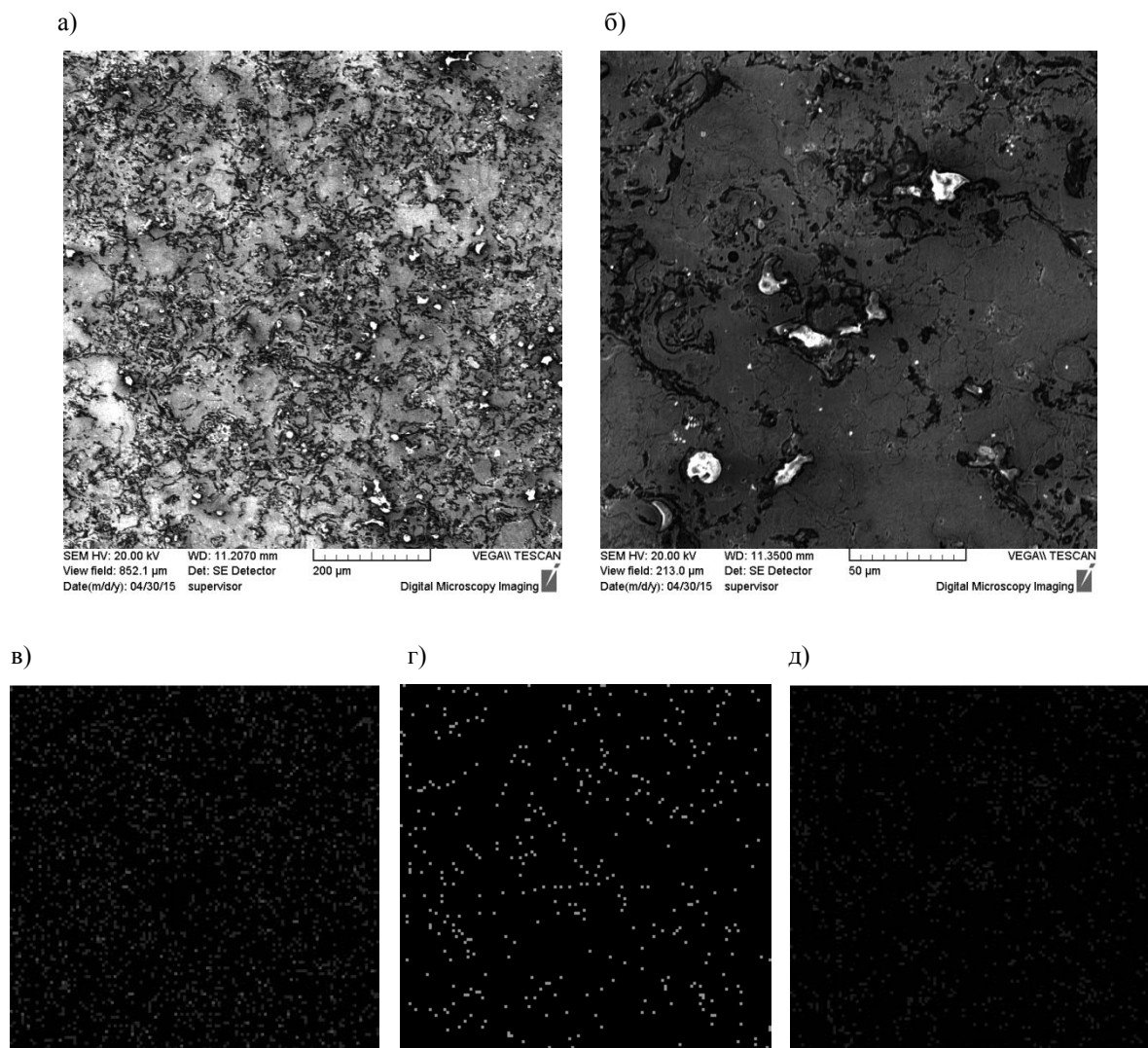


Рис. 8. Микроструктура (СЭМ) и распределение элементов (МРСА) в покрытии из порошкового материала Ni–10 % Al–6,4 % Ni₂O₃: а, б – микроструктура; в, г, д – распределение элементов Ni (в), Al (г), O (д)

Покрытия независимо от состава являются неравновесными многофазными системами. Основа их представляет собой твердый раствор алюминия в никеле. Она имеет микрокристаллический тип структуры, характеризующийся высокоразвитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированных наноразмерными включениями алюминидов Ni₂Al₃, Ni₃Al, NiAl₃, Ni₅Al₃, NiAl и ряда оксидов. Рентгенофазовым анализом установлено наличие оксидов алюминия (α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃, AlO), никеля (NiO), а также сложных оксидов

(NiAl₂O₄, (NiO · Al₂O₃)). Во всех покрытиях фиксируются исходные компоненты – никель и алюминий. Соотношение между упрочняющими фазами зависит от исходного состава шихты.

Выводы

1. Механическое легирование является простой, надежной, экологически безопасной, конкурентноспособной технологией производства импортозамещающих порошков на основе системы «никель–алюминий–оксид никеля»

для газотермических покрытий.

2. Разработанные механически легированные порошки являются однородными по химическому составу многофазными неравновесными терморегулирующими композиционными наноструктурными дисперсно-упрочненными материалами и в зависимости от состава шихты имеют микротвердость HV 415...520.

3. Полнота протекания механически активируемого взаимодействия между компонентами исследованных систем, имеющего место при оптимальной продолжительности обработки шихты в механореаторе, не превышает 40 %, и теплосодержание полученных порошковых композиций обеспечивает увеличение температуры на 600...650 °С.

4. Прочность сцепления покрытий из разработанных порошковых материалов на основе системы «Ni–10 % Al–Ni₂O₃» в 1,9 раза выше, чем у покрытий

из композиционных порошков состава Ni–10 % Al, и минимум в 1,5...2,4 раза превосходит по этому показателю покрытия из серийно выпускаемых порошков.

5. Структура покрытий из разработанных порошков характеризуется высокой плотностью, отсутствием пор и равномерным распределением компонентов. Покрытия независимо от состава являются неравновесными многофазными системами, основа которых представляет собой твердый раствор алюминия в никеле и имеет субмикроструктурный тип структуры механически легированных порошков, характеризующийся высокоразвитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированных включениями алюминидов Ni₂Al₃, Ni₃Al, NiAl₃, Ni₅Al₃, NiAl и оксидов α-Al₂O₃, γ-Al₂O₃, AlO, NiO, NiAl₂O₄, (NiO · Al₂O₃).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sahraoui, T.** Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty) / T. Sahraoui // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 152. – P. 43–55.
2. **Cheang, P.** The Effect of Dissolved Oxygen on the Structure and Properties of Plasma Sprayed Ni and Ni-Al Powders / P. Cheang, R. Mc. Pherson // Department of Materials Engineering, Monash University. – 1989. – P. 1546–1551.
3. Газотермическое напыление : учеб. пособие / Под общ. ред. Л. Х. Балдаева. – М. : Маркет ДС, 2007. – 344 с.
4. Газотермическое напыление покрытий : сборник руководящих техн. материалов. – Киев : ИЭС им. Е. О. Патона. – 1990. – 176 с.
5. **Starosta, R.** Properties of Thermal Spraying Ni-Al Alloy Coatings / R. Starosta // Advances in Materials Sciences. – 2009. – Vol. 9. – P. 30–40.
6. **Svantesson, J.** A Study of Ni-5wt. N Al Coatings Produced from Different Feedstock Powder / J. Svantesson, J. Wigren // Journal of Thermal Spray Technology. – 1992. – Vol. 1, № 1. – P. 65–69.
7. **McPherson, R.** Microstructural Analysis of Ni-Al Plasma Sprayed Coatings / R. McPherson, P. Cheang // Proceedings of Twelfth International Thermal Spray Conference, London, The Welding Institute. – 1989. – P. 17.1–17.10.
8. **Кулик, А. Я.** Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик. – Л. : Машиностроение, 1985. – С. 105–122.
9. **Neikov, O. D.** Handbook of Non – Ferrous Metal Powders. Technologies and applications / O. D. Neikov, S. S. Naboychenko, G. Dowson. – 2009. – 621 p.
10. **Борисов, А. Л.** Влияние связки и размера частиц на характер экзотермического взаимодействия компонентов композиционного порошка NiCr-Al / А. Л. Борисов // Порошковая металлургия. – 1992. – № 12. – С. 59–64.
11. **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.

12. **Ловшенко, Г. Ф.** Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов : монография / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко, Б. Б. Хина. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.
13. **Ловшенко, Ф. Г.** Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий : монография / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 216 с.
14. **Ловшенко, Г. Ф.** Высокоэффективный аппарат для реакционного механического легирования металлических систем / Г. Ф. Ловшенко, З. М. Ловшенко, А. И. Хабибуллин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 4. – С. 72–80.
15. **Борисов, Ю. С.** Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов // Навукова думка. – 1987. – С. 118–122.
16. **Ловшенко, Ф. Г.** Структура, фазовый состав и свойства газотермических покрытий из механически легированных терморреагирующих композиционных порошков системы «никель – алюминий» / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Литье и металлургия. – 2015. – № 2. – С. 109–121.
17. **Ловшенко, Ф. Г.** Закономерности формирования гранулометрического состава и структуры механически легированных композиционных порошков для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Литье и металлургия. – 2014. – № 2. – С. 101–110.
18. **Ловшенко, Ф. Г.** Влияние механического легирования на фазовый состав и теплосодержание терморреагирующих порошковых композиций на основе железа и никеля для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко, А. С. Федосенко // Литье и металлургия. – 2014. – № 4. – С. 99–108.

Статья сдана в редакцию 14 мая 2015 года

Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Григорий Федорович Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет.

Алексей Сергеевич Федосенко, ассистент. Тел.: +375-295-46-96-34.

Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

Grigory Fedorovich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University.

Aleksey Sergeyeovich Fedosenko, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-295-46-96-34.

УДК 621.75

А. П. Минаков, Е. В. Ильюшина, П. В. Афанасьев, А. Г. Суворов

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ГИЛЬЗ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

UDC 621.75

A. P. Minakov, Y. V. Ilyushina, P. V. Afanasyev, A. G. Suvorov

MODERN TECHNOLOGIES OF HYDROCYLINDER LINERS FINISHING

Аннотация

Приведен анализ современных технологий финишной обработки гильз гидроцилиндров. Рассмотрены преимущества и недостатки методов абразивной обработки и способов поверхностного пластического деформирования рабочей поверхности гильз. Обобщен положительный опыт, достигнутый в результате использования суперфинишной пневмоцентробежной обработки (ПЦО) на финишной операции изготовления гильз.

Ключевые слова:

гильза гидроцилиндра, хонингование, полирование, доводка, поверхностное пластическое деформирование, роликовый накатник, суперфинишная упрочняющая пневмоцентробежная обработка.

Abstract

The paper provides the analysis of modern technologies of hydrocylinder liners finishing. The advantages and disadvantages of methods of abrasive machining and techniques of surface plastic deformation of liners operating surface are presented. The paper summarizes the positive experience gained from the use of superfinishing pneumocentrifugal processing (SPP) in the finishing operation of liners manufacture.

Key words:

hydrocylinder liner, honing, polishing, refinement, surface plastic deformation, roller-burnishing tool, superfinishing strengthening pneumocentrifugal processing.

Машиностроительный комплекс Республики Беларусь располагает высокотехнологичным производственным и научным потенциалом. Высокими темпами будут развиваться экспортоориентированные и импортозамещающие производства автомобильной промышленности, тракторного и сельскохозяйственного машиностроения [1].

Неотъемлемой составной частью промышленного оборудования и мобильных машин является гидропривод. Современную машину без гидропривода представить невозможно. Поэтому качество машины в целом в значительной степени зависит от качества гидро-

привода и гидроцилиндра как составной его части.

Самая трудоемкая по механической обработке деталь гидроцилиндра – гильза. В большинстве случаев по категориям жесткости ее можно отнести к маложестким и тонкостенным деталям [2], а это сказывается на качестве внутренней поверхности и геометрической точности.

Способ обработки отверстия гильзы определяется комплексом факторов, среди которых учитывают габаритные размеры, материал заготовки и её массу; объем выпуска, форму и тип организации производства; наличие имеющегося

технологического оборудования и оснастки. К главным факторам относят точность, производительность и рентабельность каждого из способов.

Черновое растачивание отверстия гильзы производится с помощью расточных головок на вертикальных, горизонтальных или наклонных токарно-расточных станках [3]. К чистовым операциям обработки внутренней поверхности гильзы относят тонкое растачивание, поверхностное пластическое деформирование и абразивную обработку [4].

При большем значении финишных операций обработки конечный результат будет зависеть от того, сколько отрицательных факторов пройдет через весь комплекс операций вплоть до готовой детали и насколько они будут подавлены или нейтрализованы, положительными факторами тем самым уменьшая технологическую наследственность [5].

Достижение высокого класса шероховатости имеет прямую зависимость от трудоемкости обработки. Наибольшая трудоёмкость присуща абразивной обработке, в частности хонингованию.

Хонингование обеспечивает получение высокой точности размеров, геометрической формы и малой шероховатости обработанной поверхности [6].

Сущность процесса хонингования состоит в снятии припуска брусками хонинговальной головки, шарнирно соединенной с шпинделем станка и совершающей вращательное и возвратно-поступательное движения (а иногда и колебательное), в результате чего хонинговальные бруски движутся по винтовым линиям [7].

В процессе хонингования бруски снимают припуск 0,01...1,0 мм и более на диаметр. При этом удаляются гребешки микронеровностей и основной металл. В пределах снимаемого припуска обеспечивается исправление погрешностей предыдущих операций в виде конусности, эллипсности, бочкообразности, корсетности, огранки и в некото-

рой степени искривления оси отверстия.

После установления общего припуска назначают число операций, распределяют припуск по операциям и подбирают характеристику режущих брусков. Обработка в несколько операций вызвана невозможностью обеспечить большой съём металла и одновременно низкий параметр шероховатости поверхности одними и теми же брусками. Большой припуск при хонинговании можно снять крупнозернистыми брусками, которые, срезая металл, сохраняют параметр шероховатости поверхности, необходимый для самозатачивания брусков. Поэтому основной припуск следует снимать на первой операции. Параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,4 \dots 0,8$ мкм надежно обеспечивается одной операцией хонингования [6, 8, 9].

На чистовых операциях припуск должен быть достаточным лишь для удаления шероховатости поверхности после предварительного хонингования. При чистовом хонинговании с получением параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,1 \dots 0,2$ мкм и выше следует применять алмазные бруски [6].

Интенсивный износ и повышенный расход алмазов наблюдаются при обработке вязких металлов с низкой твердостью (сырые стали), что происходит за счет удаления сходящей сливной стружкой связки вокруг зерен и их выпадения.

При достижении более высокого класса шероховатости поверхности в значительной степени уменьшается производительность обработки за счет изменения величины продольной подачи, а применение мелкозернистых брусков ведет к быстрому засаливанию.

Большинство хонинговальных станков, выпускаемых как и в Беларуси, так и за рубежом, не снабжены механизмом осцилляции инструмента. Поэтому традиционный метод хонингования самый распространенный в странах СНГ. При традиционном методе хонингования

траектория рабочего движения инструмента образуется в результате вращения и возвратно-поступательного движения вдоль оси обрабатываемой детали [10].

Данная кинематика движения создает типичную для традиционного хонингования сетку следов в виде пересекающихся винтовых линий (рис. 1).

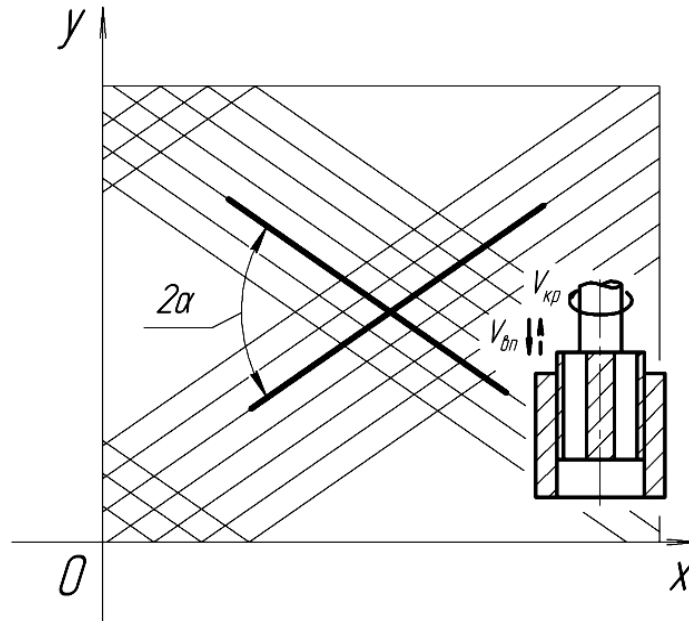


Рис. 1. Траектория движения абразивных частиц при традиционной схеме хонингования

Единственным параметром траектории, позволяющим изменять количественные и качественные показатели, является угол скрещивания следов обработки 2α , зависящий от соотношения скоростей вращения $V_{кр}$ и возвратно-поступательного движения $V_{ос}$.

Усложнение траектории относительного движения инструмента и детали выступает еще одним направлением совершенствования процесса хонингования. Известны схемы вибрационного хонингования, в которых усложнение траектории осуществляется путем наложения на основные движения дополнительных колебательных движений. Различают несколько схем вибрационного хонингования: с осевой, с круговой, с радиальной и с комбинированной осцилляцией инструмента [8]. Хонингование с

осевой осцилляцией позволяет существенно повысить производительность процесса в 1,5...2 раза, это связывают с увеличением частоты и амплитуды колебаний инструмента. Интенсивность износа брусков при этом также увеличивается, но в меньшей мере, чем интенсивность съема припуска металла [11].

Разнонаправленная траектория при круговой осцилляции, развернутая на плоскость, показана на рис. 2, а.

Развитием вибрационного хонингования является метод вихревого хонингования, разработанный в Рижском техническом университете (рис. 2, б). Главное его отличие от других методов в том, что инструменту одновременно сообщаются осевые и круговые колебания с одинаковыми частотами [12].

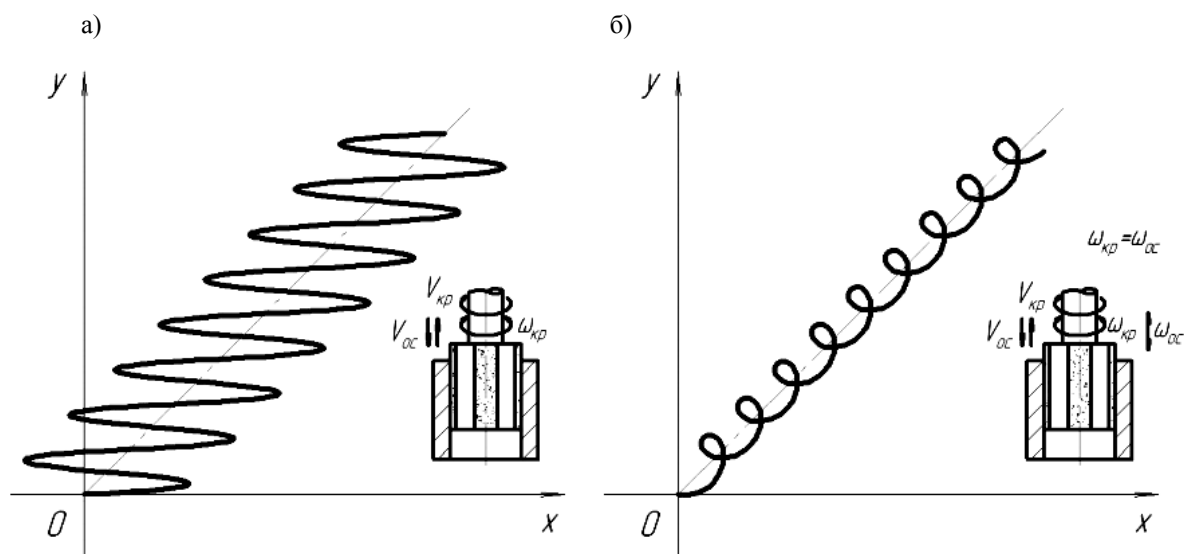


Рис. 2. Траектория движения абразивных частиц при вибрационном (а) и вихревом (б) хонинговании

Одно из самых новых направлений хонингования – «растровый» метод, разработанный в Пермском государственном техническом университете [13]. Схема элементарных движений при

«растровом» хонинговании приведена на рис. 3.

«Растровая» траектория рабочего движения, развернутая на плоскость, показана на рис. 4.

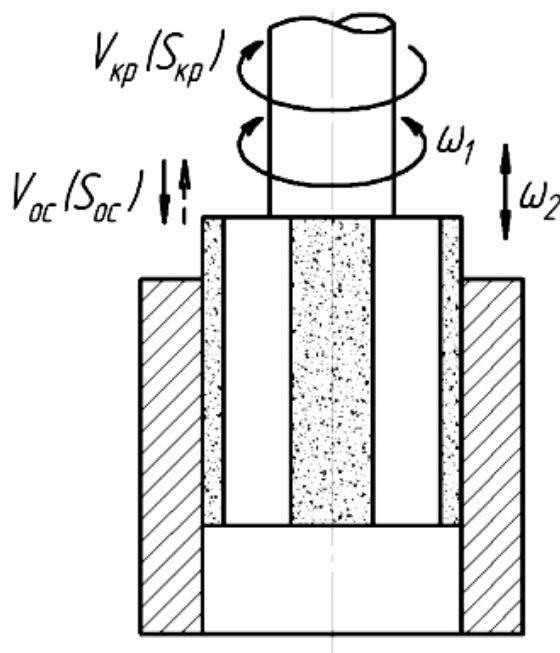


Рис. 3. Траектория движения инструмента

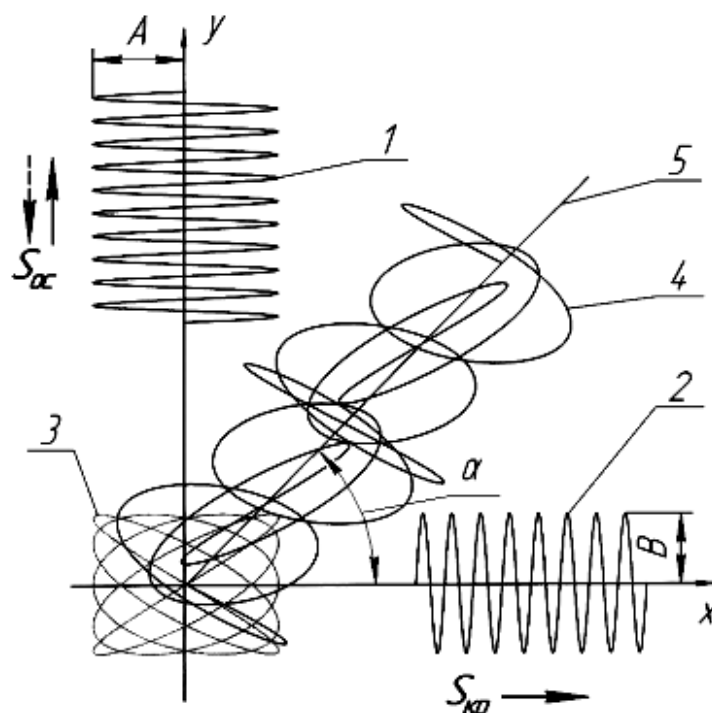


Рис. 4. Схема элементарных движений инструмента при растровом хонинговании

Одно из главных отличий «растрового» хонингования с кинематикой от традиционного и вибрационных методов заключается в том, что главное движение резания есть результат комбинации двух синусоидальных колебаний с различными частотами ω_1 , ω_2 ($\omega_1 > \omega_2$) и амплитудами A и B во взаимно перпендикулярных направлениях – круговых 1 и осевых 2. Для равномерного распределения образующейся сетки (растра) 3 по всей обрабатываемой цилиндрической поверхности инструменту дополнительно сообщаются возвратно-поступательное V_{oc} и вращательное V_{kp} движения с малыми скоростями, которые представляют собой осевую S_{oc} и круговую S_{kp} подачи инструмента соответственно. Таким образом, при «растровом» хонинговании траектория 4 рабочего движения режущих зерен образуется в результате комбинации четырех движений и представляет собой «растровую» траекторию 3, растянутую в направлении винтовой линии 5.

Результаты исследований показали преимущество хонингования с «растровой» траекторией; при меньшей шероховатости обработанной поверхности производительность процесса в 1,5...2 раза выше, чем при традиционном методе хонингования [13].

Хонингование не находит широкого применения в серийном производстве при обработке отверстий гильз гидроцилиндров, это связано с имеющимися недостатками:

- получение высокого класса шероховатости связано с большой трудоемкостью, обработка выполняется за несколько операций, брусками различной зернистости;
- шаржирование поверхности абразивными зёрнами негативно сказывается на износе уплотнений поршня в гидроцилиндре;
- микропрофиль поверхности характеризуется наличием острых гребешков.

Однако, несмотря на все недостатки, хонингование широко применяется

при изготовлении гильз гидроцилиндров в единичном производстве. Это связано с легкостью переналадки оборудования и возможностью изготовления цилиндров без предварительно проводимой подготовки.

Полирование предназначено для снижения параметров шероховатости без устранения отклонения формы деталей.

В качестве абразивного инструмента при полировании применяют эластичные круги и абразивные шкурки.

Для получения низких параметров шероховатости обработку следует вести в несколько операций с применением абразивного инструмента разной зернистости.

Предварительное полирование с большим съемом осуществляется абразивными шкурками зернистостью 40...25, которые обеспечивают шероховатость поверхности $Ra = 0,8...1,6$ мкм.

При окончательном полировании лентами зернистостью 16...8 достигается параметр шероховатости $Ra = 0,2...0,4$ мкм; лентами зернистостью 6...3 обеспечивается $Ra = 0,05...0,1$ мкм. Для получения более низких параметров шероховатости ленты покрывают абразивными пастами [6, 14].

Абразивная доводка является окончательным методом обработки деталей, обеспечивающим высокое качество поверхности ($Ra = 0,04...0,02$ мкм) и отклонение геометрической формы обрабатываемой поверхности в пределах $0,1...0,3$ мкм. Абразивная доводка – это сложный процесс удаления припуска с обрабатываемой поверхности детали, характеризуемый одновременным протеканием механических, химических и физико-химических процессов.

В зависимости от типа инструмента – притира – различают доводку незакрепленными зернами в составе абразивных паст и суспензий на притирах и доводку закрепленными зернами абразива (шаржированными притирами и абразивными кругами).

Доводку деталей абразивными пастами на притирах осуществляют при периодическом нанесении пасты на поверхность притира.

Доводка абразивными суспензиями на притирах осуществляется при непрерывной подаче суспензии в зону обработки или с периодической дозированной подачей.

Доводка прецизионных деталей осуществляется за две–пять операций с последующим снижением зернистости применяемого абразива в составе паст и суспензий, используемых на этапах предварительной, чистовой и окончательной доводки, и уменьшением припусков на обработку [6].

Недостатки полирования и доводки:

- обработка гильз гидроцилиндров затруднена из-за габаритов заготовки;
- плохая очистка обработанных поверхностей от микрочернового абразива приводит к быстрому износу поверхности при эксплуатации;
- получение высокого класса шероховатости связано с высокой трудоемкостью.

С помощью широко применяемых методов окончательной обработки (шлифование, хонингование, доводка) создается необходимая форма деталей с заданной точностью, но часто не обеспечивается оптимальное качество поверхностного слоя. Оно достигается поверхностным пластическим деформированием (ППД), при котором стружка не образуется, а происходит тонкое упрочнение поверхностного слоя [4].

Одним из современных направлений является *безабразивная ультразвуковая финишная обработка* (БУФО), которая была предложена Центром Ультразвуковых Технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета [15]. Технологическое оборудование для такой обработки состоит из следующих узлов: источника питания, преобразователя частоты электрического тока, системы управления, акустической системы. Ос-

новным узлом оборудования для БУФО является акустическая система, которая служит для преобразования электрической энергии в механическую.

При технологии БУФО алмазы не примеряются, но общим требованием является термодинамическая устойчивость излучателя относительно свойств обрабатываемых металлов.

Излучатель ультразвука поджимается с определенным давлением к поверхности детали. Вступая во взаимодействие с обрабатываемой деталью, ультразвук пластически деформирует ее поверхность, сглаживает вершины микронеровностей и упрочняет поверхностный слой. Один финишный проход излучателя ультразвука при исходной поверхности $R_a = 6,3$ мкм дает поверхность с $R_a = 0,1$ мкм (10 класс). Этим уникальным методом обрабатывается большинство известных марок стали, алюминий, медь и их сплавы, латунь, бронза, другие цветные металлы и сплавы.

Использование технологии БУФО исключает ручной труд, необходимость применения абразивных материалов, упрощает технологический процесс.

БУФО в серийном производстве при обработке отверстий гильз гидроцилиндров имеет некоторые недостатки:

- для повышения твердости поверхностного слоя (для упрочняющей обработки) нужны, как правило, большая мощность колебательной системы и значительное время обработки;
- при внутреннем диаметре детали менее 75 мм используются две и более акустические головки;
- процесс требует применения сложного и дорогостоящего оборудования.

Одним из самых распространенных методов при финишной обработке внутренней поверхности гильз гидроцилиндров является накатывание *роликовым инструментом* (рис. 5).

Главные преимущества обработки

роликовым инструментом:

- сохраняется целостность волокон металла и образуется мелкозернистая структура-текстура в поверхностном слое;
- отсутствует шаржирование обрабатываемой поверхности частичками шлифовальных кругов, полировочных паст;
- стабильный процесс обработки обеспечивает стабильное качество поверхности;
- создается благоприятная форма микронеровностей с большей долей опорной площади.

При раскатывании жесткими сепараторными накатниками основное влияние на качество обрабатываемой поверхности оказывают следующие параметры: конфигурация, размеры и количество роликов, угол вдавливания роликов, натяг, подача и угол установки роликов, скорость обработки, число рабочих ходов, применяемая СОЖ [4].

Относительная окружная скорость многороликового инструмента может изменяться от 2 до 200 м/мин. Увеличение окружной скорости инструмента сопровождается возрастанием тепловыделения, что снижает долговечность и ухудшает условия протекания процесса. Для диаметра менее 100 мм выбирают скорость 15...40 м/мин, для диаметра более 100 мм – 30...70 м/мин.

Накатывание целесообразно проводить за один рабочий ход, в некоторых случаях – за два, но не более [4].

Прогрессивным является применение станков, позволяющих изготавливать гильзы гидроцилиндров за один установ.

С целью наращивания мощностей по обработке гильз гидроцилиндров на ОАО «БЕЛАЗ» был закуплен и введен в эксплуатацию станок для глубокой обработки труб ML700-1-10000 немецкой фирмы «ТБТ Тифбортехник» (рис. 6).



Рис. 5. Роликовые накатники, применяемые при изготовлении гильзы гидроцилиндра в филиале ОАО «БЕЛАЗ» – управляющей компании холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» в г. Могилеве



Рис. 6. Станок модели ML700-1-10000 немецкой фирмы «ТБТ Тифбортехник»

На оборудовании используется инструментальная система, работающая по методу ВТА (расточивание / обточка / накатывание). При помощи насоса высокого давления смазочная охлаждающая жидкость (СОЖ) вместе с маслом подается в кольцевой канал, образуемый стенками отверстия и инструментом, к режущим кромкам. Выводимая из отверстия стружка и СОЖ выходят через канал внутри режущего инструмен-

та и сверлильного шпинделя. Проходя через фильтр очистки и охладитель, СОЖ попадает обратно в бак с чистым маслом [16].

Фирма «Экоролл» в настоящее время является бесспорным лидером по изготовлению накатников и комбинированного инструмента для растачивания и накатывания поверхностей отверстий (рис. 7).

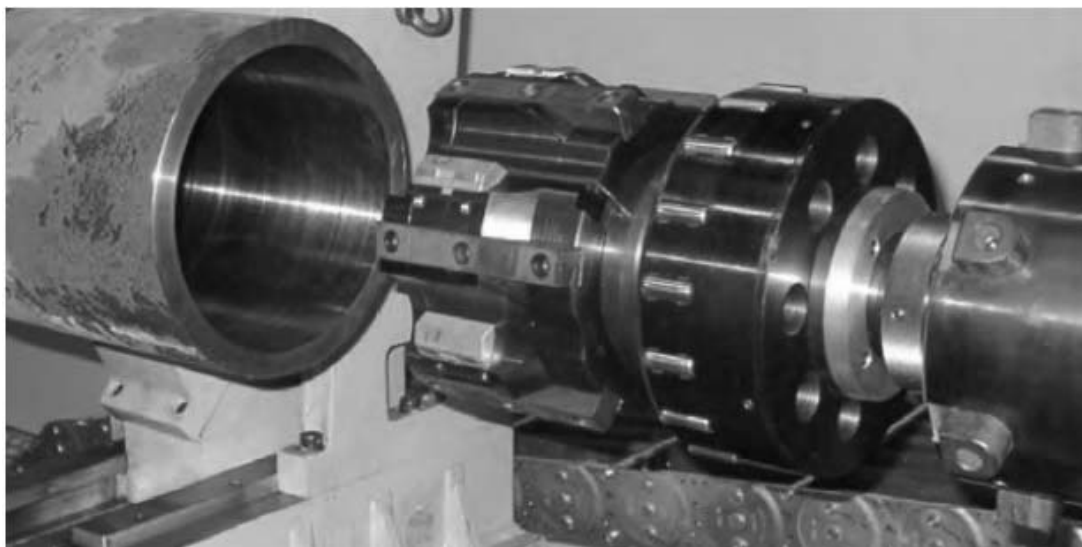


Рис. 7. Комбинированный инструмент фирмы «Экоролл»

Модельный ряд таких инструментов способен обрабатывать гильзы гидроцилиндров диаметром от 60 до 455 мм длиной до 10 м.

Режимы обработки при применении комбинированного инструмента: скорость резания – до 300 м/мин, скорость подачи – 3...6 мм/об [17]. Применение комбинированного инструмента позволяет значительно снизить трудоемкость обработки благодаря высокой производительности и получаемому качеству обработанной поверхности.

Однако современные технологии накатывания из-за отсутствия мировых и отечественных аналогов являются очень дорогими и порой непосильными для отечественного машиностроения.

Для решения этих проблем был предложен способ пневмовибродинамической обработки (ПВДО) внутренних поверхностей вращения заготовок из сталей без термообработки [18], позволяющий получать на внутренней цилиндрической поверхности стальных нежестких заготовок без термообработки шероховатость $Ra < 0,1$ мкм. Сущность способа на начальном этапе заключается в качественной лезвийной обработке отверстия, далее – в его по-

верхностном пластическом деформировании жесткими рабочими элементами до получения на обрабатываемой поверхности параметра шероховатости $Ra = 0,2...0,1$ мкм и в последующей суперфинишной пневмоцентробежной обработке (ПЦО) рабочими элементами – шарами, поверхность которых имеет параметр шероховатости $Ra \leq 0,08$ мкм.

Главным требованием для осуществления указанного способа обработки является получение хорошего качества поверхности на предшествующих операциях. Операции лезвийной обработки отверстий и ППД жесткими роликовыми накатниками хорошо изучены, они позволяют достигать необходимого качества поверхности для применения суперфинишной ПЦО.

Для ПЦО используется инструмент, показанный на рис. 8.

Перед началом обработки инструмент центрируется в заготовке. Затем подается воздух к инструменту и производится процесс накатывания. После обработки подача воздуха прекращается, а инструмент выводят в исходное положение.

После подачи сжатого воздуха шары перемещаются вдоль камеры и

получают вращательное движение, перекатываясь по обрабатываемой поверхности отверстия. Также шары осуществляют осциллирующее и радиаль-

ное перемещения по отношению к поверхности обработки и имеют шесть степеней свободы.

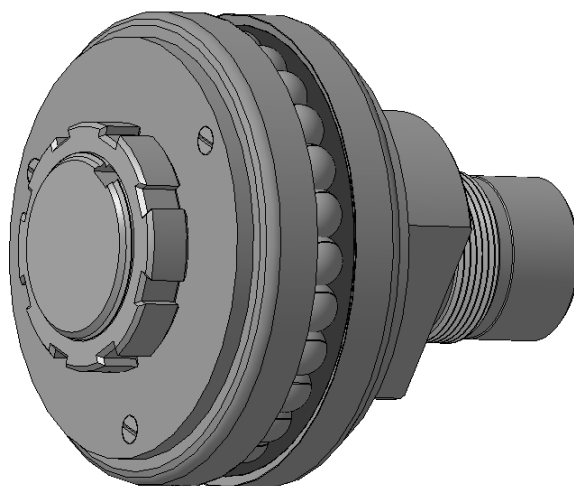


Рис. 8. Внешний вид модельного образца инструмента для суперфинишной ПЦО

Снижение шероховатости обрабатываемой поверхности достигается благодаря вибрационному воздействию шаров с низкой шероховатостью на гребешки микрорельефа. Следует отметить, что смятие и сглаживание неровностей поверхности происходит в различных направлениях в результате изменения кинетической энергии шаров.

Материал шаров намного тверже материала обрабатываемой заготовки, шары оставляют на поверхности следы в виде отдельных лунок, геометрия которых соответствует геометрии поверхности самих шаров. Используя шары с шероховатостью поверхности $Ra \leq 0,08$ мкм, можно получить шероховатость обработанной поверхности $Ra < 0,1$ мкм.

Рассматриваемый способ обработки создает благоприятную форму микронеровностей, повышая износостойкость в паре трения гильза–уплотнитель, а также несущую способность поверхности.

Применение суперфинишной ПЦО

для обработки внутренних поверхностей отверстий позволило бы отменить операцию термообработки, что дает весомый экономический эффект и возможность получения качественных и недорогих гильз.

Выводы

1. Актуальной проблемой в современном машиностроительном производстве является качество обработки рабочей поверхности гильз гидроцилиндров. Ее решение поможет отказаться от импорта гильз и позволит изготавливать надежные и качественные гидроцилиндры.

2. Анализ современных технологий финишной обработки гильз гидроцилиндров показал, что в настоящее время в отечественном машиностроении нет эффективной технологии обработки внутренней поверхности гильз, которая позволила бы получать шероховатость рабочей поверхности $Ra < 0,1$ мкм и обеспечила бы повышение износостой-

кости пары трения гильза–поршневое уплотнение и, соответственно, увеличила бы ресурс работы гидроцилиндра без серьезных материальных затрат.

3. В качестве альтернативы способам финишной обработки внутренней поверхности гильз гидроцилиндров предлагается использовать новый способ, включающий последовательность операций: размерную лезвийную обработку, поверхностное пластическое де-

формирование жёсткими рабочими элементами и суперфинишную ПЦО шарами, поверхность которых имеет шероховатость R_a менее 0,08 мкм. Для реализации процесса суперфинишной ПЦО разработана конструкция инструмента – пневматического шарикового накатника, позволяющего получить шероховатость обработанной поверхности гильзы R_a менее 0,1 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство иностранных дел Республики Беларусь; Министерство экономики Республики Беларусь. Экономико-инвестиционный обзор 2009, Республика Беларусь. – Минск, 2009. – 35 с. – Режим доступа : http://www.latbel.lv/userfiles/file/rus_print.pdf. – Дата доступа : 25.05.2015.
2. **Куклев, Л. С.** Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности / Л.С. Сатель, В. В. Фролов, Д. А. Прокошин. – М. : Машиностроение, 1978. – 104 с.
3. **Кабаков, М. Г.** Технология производства гидроприводов / М. Г. Кабаков, С. П. Стесин. – М. : Машиностроение, 1974. – 192 с.
4. **Одинцов, Л. Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием : справочник / Л. Г. Одинцов. – М. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
5. **Ящерицын, П. И.** Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжков, В. И. Аверченков. – Минск : Выш. шк., 1977. – 254 с.
6. Справочник технолога машиностроителя : в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
7. **Бабичев, А. П.** Хонингование / А. П. Бабичев. – М. : Машиностроение, 1965. – 100 с.
8. **Куликов, С. И.** Прогрессивные методы хонингования / С. И. Куликов, Ф. Ф. Ризванов. – М. : Машиностроение, 1983. – 135 с.
9. **Куликов, С. И.** Хонингование : справ. пособие / С. И. Куликов, В. А. Романчук. – М. : Машиностроение, 1973. – 168 с.
10. **Фрагин, И. Е.** Новое в хонинговании / И. Е. Фрагин. – М. : Машиностроение, 1980. – 96 с.
11. **Подураев, В. Н.** Алмазное вибрационное хонингование отверстий в стальных закаленных деталях / В. Н. Подураев, А. А. Суворов, В. И. Карпов // Синтетические алмазы в промышленности : сб. ст. – Киев : Наукова думка, 1974. – С. 56–64.
12. Устройство для сообщения колебательного движения хонинговальной головке : а. с. 378313 СССР : МПК В 24 б 33/02 / И. К. Воробьев, П. А. Давыдов, А. В. Сандалов ; Риж. политехн. ин-т. – № 1609119/25-8 ; заявл. 11.01.71 ; опубл. 18.04.73. – 1973. – № 19. – С. 2.
13. **Муратов, К. Р.** Повышение эффективности финишной абразивной обработки внутренних цилиндрических поверхностей методом растрового хонингования : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / К. Р. Муратов. – Пермь, 2010. – 153 л.
14. **Швачкина, М. В.** Судебное рассмотрение дел по заявлениям на нотариальные действия и отказ в их совершении : дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.15 / М. В. Швачкина. – М., 2013. – 221 л.
15. **Киселев, С. П.** Полирование металлов / С. П. Киселев ; под ред. Г. Ф. Кудасова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1967. – 120 с.
16. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка поверхности металлов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.bufo.ru>. – Дата доступа : 22.01.2015.
17. БЕЛАЗ – холдинг «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.belaz.by>. – Дата доступа : 22.01.2015.
18. ECOROLL AG Werkzeugtechnik [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ecoroll.de/en/ecoroll.html>. – Дата доступа : 22.01.2015.
19. Способ обработки внутренних поверхностей вращения заготовок из сталей без термообработки : пат. 2244619 РФ, С1 RU, МПК 7 В 24 В 39/02 / А. П. Минаков, О. В. Ящук, И. Д. Камчицкая, А. В. Ткачев, Е. В. Титова. – № 2004102354/02 ; заявл. 27.01.04 ; опубл. 20.01.05. – 2005. – № 2. – С. 4.

Статья сдана в редакцию 11 июня 2015 года

Анатолий Петрович Минаков, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
Тел.: 8-0222-24-18-15.

Елена Валерьевна Ильюшина, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
Тел.: 8-0298-45-25-55.

Павел Викторович Афанасьев, магистрант, Белорусско-Российский университет.

Александр Геннадьевич Суворов, студент, Белорусско-Российский университет.

Anatoly Petrovich Minakov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
Phone 8-0222-24-18-15.

Yelena Valeryevna Ilyushina, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
Phone: 8-0298-45-25-55.

Pavel Viktorovich Afanasyev, MSc student, Belarusian-Russian University.

Aleksandr Gennadyevich Suvorov, student, Belarusian-Russian University.

УДК 629.3

С. А. Рынкевич

УПРАВЛЕНИЕ И ДИАГНОСТИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ БОРТОВОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ: ЭТАПЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

UDC 629.3

S. A. Rynkevich

CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MOBILE MACHINES BASED ON ON-BOARD MICROELECTRONICS: STAGES AND PROSPECTS

Аннотация

Приведен обзор конструктивных схем планетарных гидромеханических коробок передач различных мобильных машин отечественного и зарубежного производства. Описаны технические решения ведущих зарубежных фирм, специализирующихся на производстве гидромеханических коробок передач, обеспечивающих функции автоматизации управления и диагностирования.

Ключевые слова:

гидромеханическая передача, планетарная коробка передач, кинематическая схема, передаточное число, мобильная машина.

Abstract

The paper presents a review of design diagrams of planetary hydromechanical gearboxes for different mobile machines of domestic and foreign make. It also describes engineering solutions of leading foreign companies, specializing in the production of hydromechanical gearboxes, which provide the control and diagnosing automation functions.

Key words:

hydromechanical transmission, planetary gearbox, kinematic diagram, gear ratio, mobile machine.

Гидромеханические трансмиссии и многоступенчатые коробки передач мобильных машин: проблемы их эксплуатации

В конструкциях автомобилей, тракторов, строительно-дорожных и других мобильных машин широкое применение получили гидрофицированные механизмы, в том числе гидромеханические передачи (ГМП), способствующие увеличению срока службы двигателя и трансмиссии, уменьшению количества ступеней в механической части трансмиссии, сокращению числа переключений передач, повышению проходимости и комфортабельности за счет более плавного изменения момента

на ведущих колесах при трогании с места и разгоне [1].

На современном этапе развития транспортной техники происходит быстрая смена выпускаемых моделей при интенсификации процессов модификации мобильных машин, возрастании числа новых разработок, что обеспечивает подвижным объектам более высокие потребительские качества и конкурентоспособность на рынках сбыта.

Разрабатываемые мобильные машины и их механизмы должны превосходить существующие, иметь высокие показатели технического уровня и эффективности их использования. Эффективное и надежное функционирование

мобильных машин может быть обеспечено лишь путем применения самых совершенных принципов, методов и технических средств определения их технического состояния, т. е. современных методов диагностирования.

Для качественного определения технического состояния гидромеханических передач мобильных машин, оперативной постановки технического диагноза, своевременного выявления опасных отклонений параметров, обнаружения отказов и скрытых дефектов, предотвращения появления неисправностей и прогнозирования остаточного ресурса необходимо использовать современную научную методологию, основанную на экспериментальных и теоретических методах исследований и новых способах обработки результатов исследований.

На автотранспортных средствах применяют **механические трансмиссии**, в состав которых входит **многоступенчатая коробка передач**, позволяющая изменять передаточные числа трансмиссии. Функции трансформаторных элементов в механической трансмиссии выполняют зубчатые передачи, осуществляющие преобразование параметров потока энергии, передаваемой от двигателя к ведущим колесам автомобиля. Параметрами потока энергии являются вращающие моменты и угловые скорости вращения валов, на которых расположены шестерни зубчатых передач. Преобразование вращающего момента характеризуется коэффициентом трансформации, а угловой скорости – передаточным числом [1]:

$$K = M_{\text{ВЫХ}} / M_{\text{ВХ}} ; \quad (1)$$

$$u = \omega_{\text{ВХ}} / \omega_{\text{ВЫХ}} = n_{\text{ВХ}} / n_{\text{ВЫХ}} , \quad (2)$$

где K – коэффициент трансформации вращающего момента; u – передаточное число трансформатора (зубчатой передачи); $M_{\text{ВХ}}, M_{\text{ВЫХ}}$ – вращающие моменты на входе и выходе зубчатой передачи, Н·м; $\omega_{\text{ВХ}}, \omega_{\text{ВЫХ}}$ – угловые

скорости вращения ведущей и ведомой шестерен зубчатой передачи, рад/с; $n_{\text{ВХ}}, n_{\text{ВЫХ}}$ – частоты вращения этих же шестерен, об/мин.

Коэффициент трансформации K отличается от передаточного числа u тем, что он учитывает потери энергии в зубчатом зацеплении:

$$K = u\eta, \quad (3)$$

где η – КПД трансформатора (зубчатой передачи).

Характерной особенностью зубчатой передачи является постоянство передаточного числа u , поэтому для получения необходимого диапазона изменения скорости движения автомобиля и вращающего момента на ведущих колесах применяют многоступенчатую коробку передач (МКП).

Основные преимущества многоступенчатой механической трансмиссии – высокий КПД и сравнительно простая конструкция. Однако ступенчатое преобразование параметров потока энергии с помощью МКП затрудняет возможность оптимального использования мощности двигателя и усложняет обоснованный выбор передаточного числа коробки передач. В результате снижается использование мощности двигателя и производительность автомобиля, повышается напряженность работы водителя в сложных дорожных условиях. Этим объясняется необходимость и целесообразность использования в составе трансмиссии **бесступенчатой передачи**.

Бесступенчатое преобразование параметров потока энергии могут осуществлять *гидродинамические, гидрообъемные и электрические передачи*, а также *вариаторы* различных конструкций.

Бесступенчатая передача (БП) позволяет плавно и непрерывно изменять вращающие моменты на ведущих колесах и скорость движения автомобиля в зависимости от нагрузки, дорожных условий и управляющих воздействий водителя на педаль акселератора. Приме-

нение БП улучшает функциональные свойства трансмиссии, облегчает и упрощает управление, повышает технико-экономические показатели, технический уровень и конкурентоспособность автомобиля. Динамическая характеристика мобильной машины с БП приближается к гиперболическому виду, т. е. к идеальной форме, что способствует его приспособляемости к изменяющимся нагрузкам, повышению средней скорости движения и производительности. Плавное и непрерывное преобразование параметров потока энергии, подводимой к ведущим колесам, способствует снижению их буксования, оказывает положительное влияние на проходимость, снижает динамические нагрузки на механизмы трансмиссии и двигатель и за счет этого значительно увеличивает их срок службы. Вместе с тем БП по сравнению с механическими ступенчатыми коробками передач гораздо сложнее по конструкции, требуют более совершенных технологических процессов производства, технического обслуживания и ремонта, что приводит к увеличению производственных и эксплуатационных затрат и к необходимости использования обслуживающего персонала более высокой квалификации. Стоимость современных гидромеханических трансмиссий составляет до 20 % стоимости всей машины, а выход их из строя сопровождается большими материальными затратами. Этим обусловлена настоятельная потребность внедрения систем автоматизированного управления и непрерывного диагностирования технического состояния этих сложных и дорогостоящих передач.

Недостатками современных бесступенчатых передач являются сравнительно низкий КПД и ограниченный диапазон регулирования вращающего момента и скорости. В связи с этим их обычно используют в сочетании с механическими зубчатыми передачами, позволяющими повысить КПД трансмиссии и получить необходимый диапазон

регулирования.

В зависимости от типа используемой бесступенчатой передачи различают следующие виды трансмиссии: *гидромеханические* (ГМТ), *гидрообъемно-механические* (ГОМТ), *электромеханические* (ЭМТ). Одним из существенных достоинств этих видов трансмиссий является их хорошая приспособленность к автоматическому управлению процессами трансформации параметров потока энергии, передаваемой к ведущим колесам.

Гидродинамические передачи обладают свойством саморегулирования и представляют собой автоматические трансформаторы механической энергии. Гидрообъемные и электрические передачи несаморегулируемые. Их потенциальные возможности в полной мере могут быть реализованы лишь при применении систем автоматического управления.

Использование ГМП в конструкции автомобилей увеличивает срок службы двигателя и трансмиссии, а также повышает проходимость и комфортабельность за счет более плавного изменения момента на ведущих колесах, трогания с места и разгона.

Основная проблема автоматизации управления / диагностирования гидрофицированными мобильными машинами связана с многообразием и огромной сложностью происходящих при функционировании процессов. Для ее решения необходимо использование технологий и методов, основанных на других подходах, отличных от тех, которые опираются на принципы классической теории автоматического управления.

Переход на новый этап проектирования систем управления трансмиссиями мобильных машин

Выделим несколько противоречий, возникших на нынешнем этапе развития научно-технического прогресса.

Появились широкие возможности управления / диагностирования, связан-

ные с развитием и внедрением на машинах современных быстродействующих систем, совместимых с портативной вычислительной техникой, появлением развитого программного обеспечения, прикладных средств и программных комплексов. Но возникает существенное противоречие традиционных алгоритмов управления / диагностирования: чем больше полнота снимаемой датчиками и обрабатываемой процессором информации, тем длительнее сама процедура выдачи управляющих команд. Сюда относится и низкое быстродействие получаемого диагноза, и неточность указания места локализации неисправности. А это имеет серьезные последствия: снижение эффективности диагностирования и, как следствие, возникновение неисправностей и поломок из-за необнаруженных и своевременно не предотвращенных опасных и аварийных ситуаций, что приводит к снижению безопасности.

Системы автоматизированного управления / диагностирования, использующие традиционные (и порой устаревшие) методы, позволяют решать частные задачи, не обладают оперативностью, не способны функционировать в режиме реального времени, не приспособлены к постоянно изменяющимся условиям. Они не учитывают одновременно многих обстоятельств и ситуаций, не способны подвергать адекватному анализу характеристики механизмов, внешней среды, субъективные факторы, связанные с деятельностью водителя, механика и т. д. Появились новые средства измерения и электронные устройства, однако это не решает проблемы в полной мере и требует поиска других подходов.

Появление новых средств и методов получения, представления, передачи и обработки информации, увеличение возможностей бортовых компьютеров и средств микропроцессорной техники, использование новых технологий сти-

мулировало процесс разработки перспективных диагностических систем, использующих новые информационные технологии.

В связи с качественным прогрессивным изменением уровня производительных сил общества в настоящее время назрела необходимость формирования новой идеологии, или парадигмы, т. е. совокупности мировоззренческих концепций, лежащих в фундаменте соответствующей науки (рис. 1). *Парадигма-идеология* включает: концептуальные рамки науки; основные установки; конкретные традиции научного исследования; совокупность убеждений, ценностей и технических средств; главные философские элементы и т. д. В основе этой парадигмы-идеологии лежит новый подход к автоматизации технического объекта. Главное направление и задача новой идеологии автоматизации – это обеспечение высокого технического уровня создаваемых машин, их совершенствование и повышение конкурентоспособности. Новая идеология предусматривает совокупность интеллектуального управления при создании бортовых систем, применение новых методов сбора, анализа и представления информации и новых информационных технологий. В связи с этим она порождает ряд концепций, теорий, тенденций и идей, требующих разработки соответствующего понятийного аппарата, гипотез, методологий и методов.

Идеология автоматизации управления и диагностирования воплощается в практику на основе создания соответствующих интеллектуальных систем [1]. В настоящее время процесс автоматизации управления и диагностирования гидрофицированных машин должен осуществляться на основе создания интеллектуальных систем, способных одновременно учитывать большое количество различных характеристик, функционировать в режиме реального вре-

мени и реализовывать алгоритмы, подобные логике человеческого мышления. Интеллектуальные системы (ИС), в отличие от обычных, работают со зна-

ниями; они наделены функциями распознавания, обучения, прогнозирования.



Рис. 1. Новая идеология в автоматизации подвижных объектов

В основе создания ИС лежат принципы искусственного интеллекта, использование которых позволяет значительно расширить потенциальные возможности методов и средств диагностирования и получить гибкие алгоритмы диагностирования, отражающие многообразие различных факторов. Системы управления / диагностирования, функционирующие по таким алгоритмам, способны в сложной обстановке оперативно принимать решения, свойственные логическому мышлению человека, непрерывно реагировать на

всевозможные изменения внешних воздействий, осуществлять постоянный анализ и оценку текущих ситуаций, идентифицировать и распознавать их, обеспечивать с человеком взаимопонятный диалог и давать рекомендации водителю (оператору), осуществлять анализ речевых команд.

В качестве научной основы создания таких систем используется новое научное направление «Теория искусственного интеллекта» (ТИИ). ТИИ включает в себя различные информационные технологии. Наиболее распространен-

ные технологии искусственного интеллекта – это экспертные системы, теория нечетких множеств и теория искусственных нейронных сетей [2, 3].

Применение этих технологий позволяет выйти на новый уровень проектирования электронных бортовых систем. Создание интеллектуальных систем управления и диагностирования (ИСУД) позволяет решить ряд проблем.

Во-первых, появляется возможность создания систем управления / диагностирования, использующих большое количество информации различной физической природы. Во-вторых, возникают условия для создания и реализации гибких алгоритмов, позволяющих системам приспосабливаться к изменению различных ситуаций и условий эксплуатации. В-третьих, упрощается конструкция автоматических систем и снижается стоимость создаваемых изделий. В-четвертых, появляются возможности использования программ управления / диагностирования в режиме реального времени. В-пятых, системы, наделенные интеллектуальными качествами, приобретают способность к обучению (самообучению). Это выражается в расширении и значительном пополнении базы знаний таких систем в процессе эксплуатации объекта диагностирования, накоплении и осмыслении информации, запоминании и распознавании различных ситуаций, в том числе проявлений неисправностей, причин и условий их возникновения. В рамках новой идеологии автоматизации были разработаны стратегия и методология синтеза ИСУД для мобильных машин. Стратегия включает в себя несколько важнейших этапов: *разработка концепции ИСУД; разработка общей структуры ИСУД; синтез алгоритмов функционирования ИСУД; создание ИСУД в виде готового изделия; реализация ИСУД на объекте.*

Данные этапы диалектически взаимосвязаны и соответствуют следующим иерархическим уровням: философия и

идеология; теоретизация; инженерия творчества; проектирование и производство; прогноз и перспективы.

Применительно к сфере автомобиле- и тракторостроения разрабатываемые системы технического диагностирования должны обеспечивать следующие основные функции:

- оперативное определение технического состояния основных механизмов автомобиля в текущий момент времени;
- диагностирование параметров элементов и механизмов трансмиссии, тормозной системы, подвески, гидропривода;
- осуществление непрерывного контроля основных параметров механизмов и их элементов (температуры, давления масла в магистралях и фрикционных, напряжения на электромагнитах и др.);
- идентификация и предотвращение опасных ситуаций, связанных с управлением автомобилем и функционированием его механизмов;
- осуществление защиты от ошибочных управляющих действий водителя;
- анализ информации о текущих процессах с выдачей водителю сигналов отклонений от технических требований;
- осуществление измерения пробега автомобиля, расхода топлива, количества перевозимого за смену груза и других параметров;
- обеспечение приема информации от других измерительных систем по любому из стандартных интерфейсов;
- выдача результатов диагностирования в текстовом и графическом виде;
- отображение текущего состояния объектов диагностирования в графическом режиме на дисплее в виде вербальной, символьной информации;
- осуществление диспетчеризации и ведения протоколов работы системы;
- хранение в памяти результатов текущего диагностирования, а также результатов технического состояния, в котором находился автомобиль в прош-

лом, с возможностью вывода их на печать или перезаписи на электронные носители информации.

Для обеспечения отмеченных выше функций ИСУД должна иметь оригинальную конфигурацию и структуру [3]. Помимо традиционных микропроцессорных модулей, в ее состав должна входить экспертная система, реализующая новые информационные технологии (например, нечеткой логики, искусственных нейронных сетей и др.). В первом случае экспертная система выполняется на основе нечеткого контроллера с соответствующей аппаратной и программной реализацией и содержит интеллектуальный интерфейс с вычислительной системой верхнего уровня (RS-232, RS-485, CAN 2.0 В) и интеллектуальный интерфейс с подсистемой нижнего уровня (CAN 2.0 В, RS-485) с возможностью подключения любых локальных микропроцессорных устройств, поддерживающих стандартный протокол CAN 2.0 В.

Коллективом кафедры «Автомобили» Белорусско-Российского университета (проф. В. П. Тарасиком, доц. Н. Н. Горбатенко, ст. преподавателем Р. В. Плякиным и др.), занимающимся автоматизацией управления гидрофицированными трансмиссиями мобильных машин, разработаны группы диагностических и контролируемых параметров и структура ИСУД ГМП карьерного самосвала БелАЗ (рис. 2).

Основные информационные параметры, такие как частота вращения вала двигателя, турбинного вала гидротрансформатора, входного и выходного вала коробки передач, положение педали акселератора, положение педали тормоза, скорость автомобиля, степень загрузки, давление в подвеске и др., могут быть описаны функциями принадлежности нечеткой логики [4].

Варианты построения экспертных

систем ИСУД и реализуемые в них методы могут быть различными. На рис. 2, б показан пример созданной экспертной системы для диагностирования гидромеханической передачи мобильной машины. Для вывода оператору сообщений экспертной системы могут создаваться специальные диалоговые окна (рис. 2, в, г).

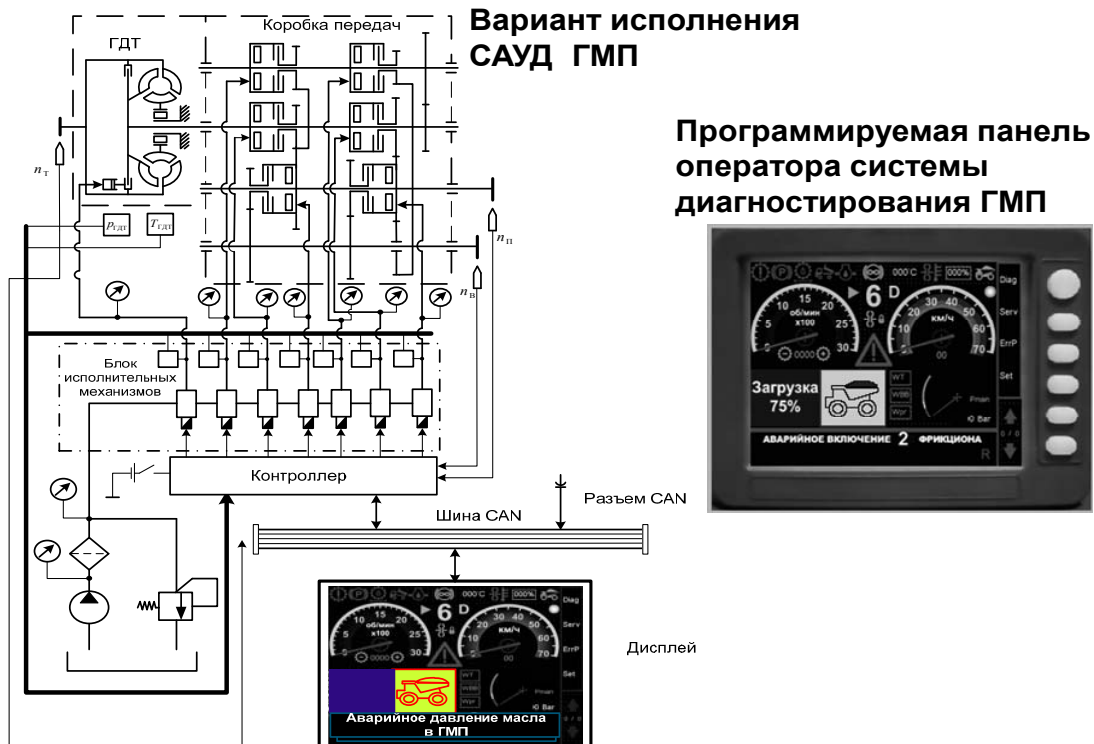
Сфера использования таких систем – мобильные машины различного назначения, в том числе карьерные автосамосвалы, строительно-дорожные машины, погрузчики, шахтные землевозы, подземная и военная техника и т. д. (рис. 3).

Решение проблемы в сфере проектирования и эксплуатации трансмиссий мобильных машин на основе новых технологий и путём гибридизации ГМП

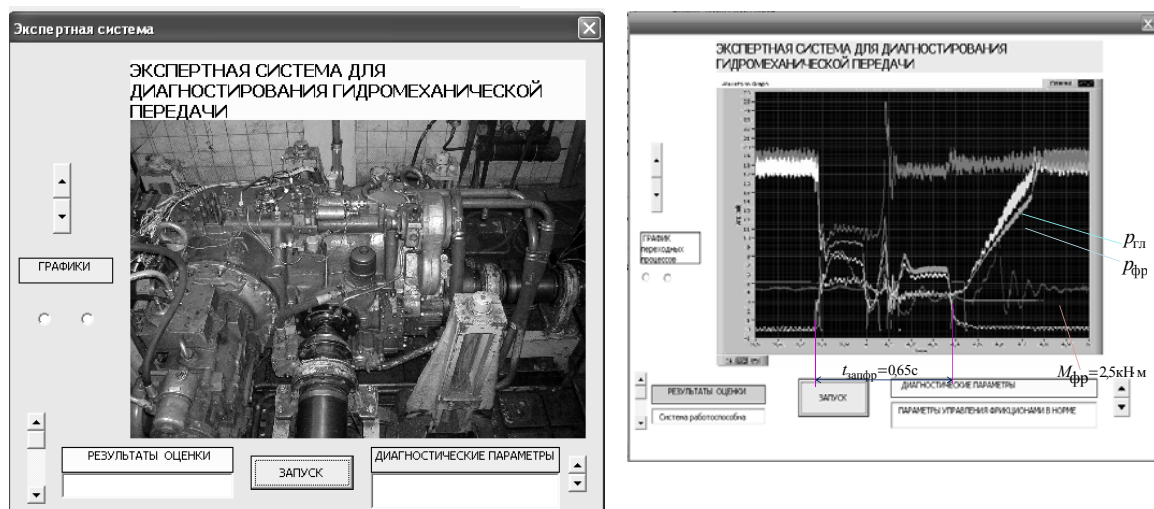
К настоящему времени, **во-первых**, появились реальные возможности и назрела необходимость применения гибридных силовых установок в выпускаемой российским и белорусским машиностроением тяжелой мобильной технике, которая имеет гидромеханические трансмиссии, – путем гибридизации последних; **во-вторых**, появились условия для создания на этой базе гибридных электромеханических трансмиссий, которые (как преемники) становятся перспективным и ведущим направлением мирового развития гибридных силовых (энергетических) установок.

В связи с ухудшением экологической обстановки в современном автомобилестроении прослеживается тенденция развития автомобилей с **комбинированной энергетической установкой** (КЭУ). Автомобили с КЭУ отличаются от традиционных наличием двух двигателей (ДВС и электрического).

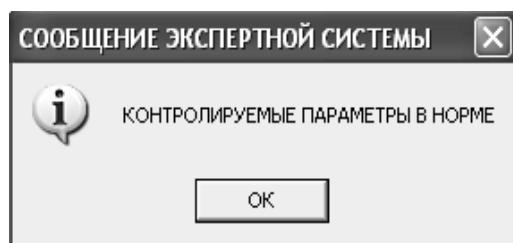
а)



б)



в)



г)

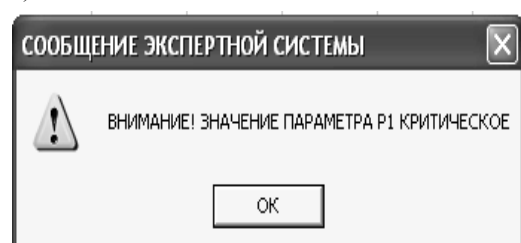


Рис. 2. Структура ИСУД и процесс определения технического состояния гидропривода экспертной системой гидрофицированной мобильной машины: а – схема ИСУД; б – исходное состояние экспертной системы; в, г – диалоговые окна экспертной системы в случае отклика на нормальное и опасное состояния

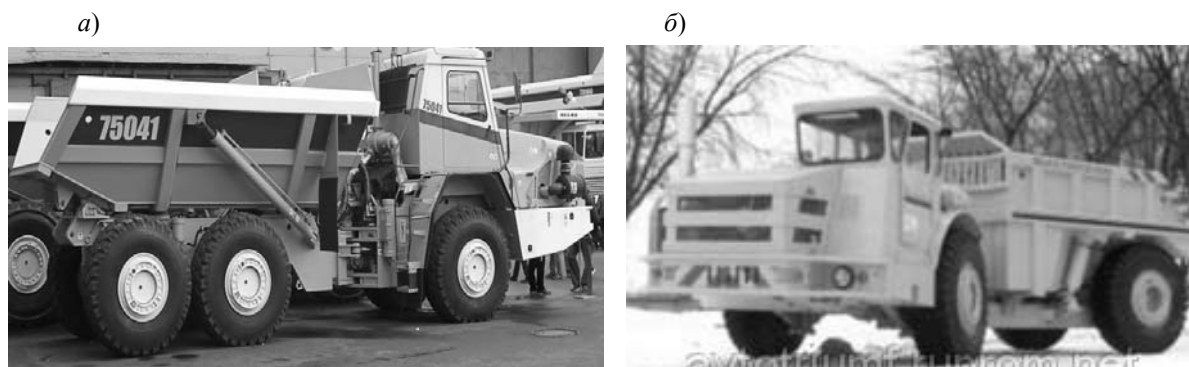


Рис. 3. Землевозы и подземная техника Могилевского завода им. С. М. Кирова: а – самосвал-землевоз МоАЗ-75041 грузоподъемностью 27 т; б – самосвал шахтный МоАЗ-74052-9586 грузоподъемностью 25 т

Интерес к таким автомобилям вызван также тем, что они обладают меньшим расходом топлива и меньшей токсичностью отработавших газов, что *весьма актуально для крупных городов с*

большим автомобильным парком.

Рассмотрим рис. 4, иллюстрирующий распространение по годам различных типов трансмиссий, энергетических установок и автомобилей.

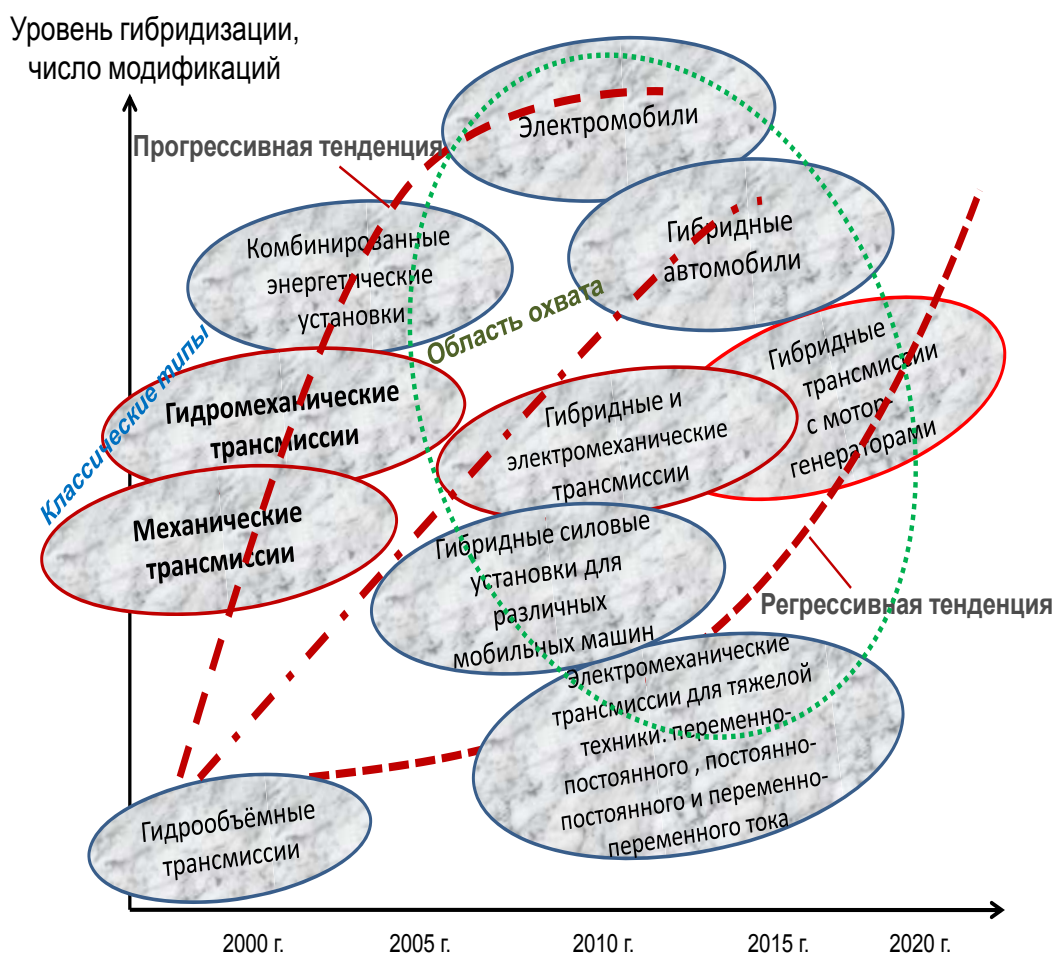


Рис. 4. Распространение различных типов трансмиссий, энергетических установок и автомобилей

Производство автомобилей, особенно легковых, с КЭУ идет по прогрессивной тенденции. Причем они постепенно замещают (если даже не сказать «вытесняют») классические типы трансмиссий: чисто механические и гидромеханические. В то же время модернизация тяжелой техники (например, большегрузных карьерных самосвалов с электрической трансмиссией) идет по регрессивной тенденции. Из рис. 4 так-

же видно, что область охвата перспективной техники на современном этапе представлена именно машинами с КЭУ, гибридными автомобилями и электромобилями.

Комбинированную гибридную трансмиссию CVT, установленную на автомобиле «Тойота-приус» (рис. 5), разработчики назвали PSD (Power Split Device, устройство распределения мощности, «трёхходовая муфта»).

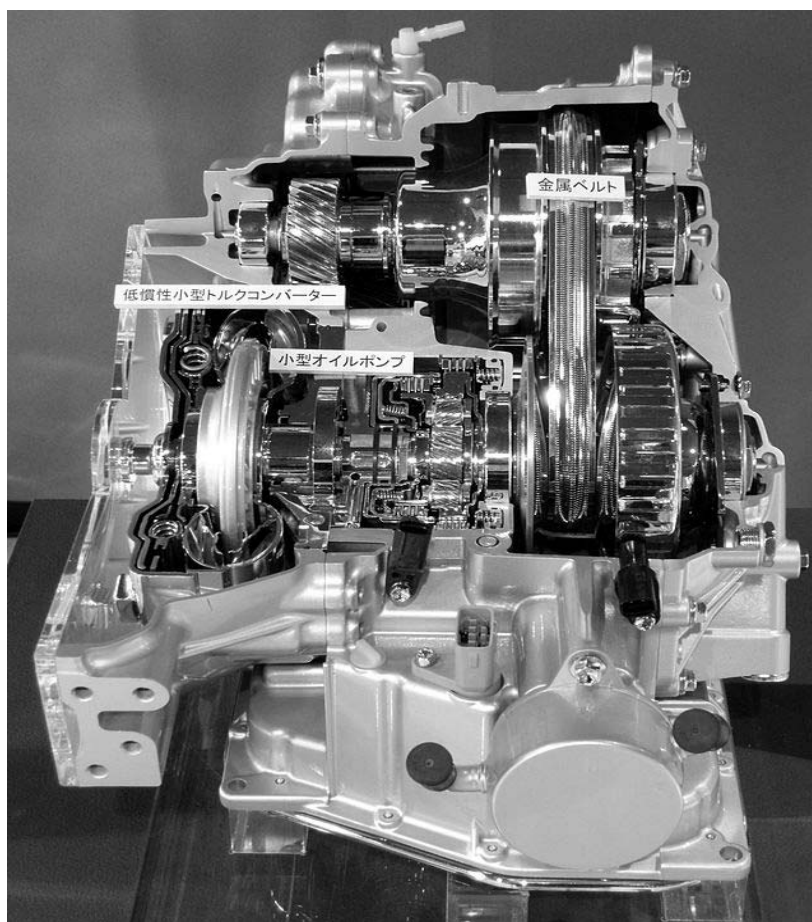


Рис. 5. Вариант конструкции гибридного привода (гибридной передачи)

Построено PSD на основе планетарной передачи, где с «солнечным колесом» соединён генератор, водило сателлитов соединено с двигателем, а «коронная шестерня» — с электромотором и колёсами. Поскольку соотношение диаметров (числа зубьев) шестерён планетарной передачи посто-

янное, планетарная передача делит крутящий момент двигателя внутреннего сгорания в постоянном отношении. Однако мотор-генератор, соединённый с «солнечным колесом» планетарной передачи, может быть больше или меньше нагружен электрическим током.

Комбинированная гибридная трансмиссия

Процессом управляет контроллер гибридной системы автомобиля. Тормозной момент и, соответственно, частота вращения генератора могут изменяться в широких пределах (частота от -6000 до $+6000$ об/мин), при этом генератор может работать и как электромотор. В связи с этим скорость вращения колес автомобиля изменяется плавно, бесступенчато. При этом мощность, получаемая генератором, не пропадает, в виде электрической энергии поступает на тяговый электромотор и, объединяя усилия с моментом двигателя, приводит в движение автомобиль. Такой гибридный привод еще называют гибридным синергетическим.

Выводы

Решение проблемы в сфере проектирования и эксплуатации трансмиссий мобильных машин видится в осуществлении трех этапов.

1. Автоматизация управления и диагностирования механизмами гидрофицированных мобильных машин на новом уровне с учетом новой идеологии и на основе современных средств и методов сбора, обработки, анализа и передачи информации и создания на этой базе комплексных бортовых систем.

2. Развитие процесса гибридизации гидромеханических трансмиссий и создание автомобилей с гибридными энергетическими установками.

3. Создание роботизированных подвижных объектов и техники на новейших научно-технических принципах с учетом новых интеллектуальных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасик, В. П.** Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами / В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Минск : Технопринт, 2004. – 512 с. : ил.
2. **Тарасик, В. П.** Технологии искусственного интеллекта в диагностировании автотранспортных средств / В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 280 с. : ил.
3. **Рынкевич, С. А.** Новые технологии и проблемы науки на транспорте / С. А. Рынкевич. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 337 с. : ил.
4. Диагностирование гидромеханических передач мобильных машин / Н. Н. Горбатенко [и др.] ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. П. Тарасика. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 511 с. : ил.

Статья сдана в редакцию 12 июня 2015 года

Сергей Анатольевич Рынкевич, д-р техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: rynkev@tut.by.

Sergey Anatolyevich Rynkevich, DSc (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: rynkev@tut.by.

УДК 629. 113: 536

В. П. Тарасик

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ДИСКОВЫХ ФРИКЦИОНАХ ТРАНСМИССИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

UDC 629. 113: 536

V. P. Tarasik

MATHEMATICAL MODEL OF HEAT TRANSFER IN DISK-TYPE FRICTION CLUTCHES OF MOBILE MACHINES TRANSMISSIONS

Аннотация

Разработана математическая модель теплопередачи в дисковых фрикционах, обеспечивающая корректное описание физических свойств контактирующих дисков, закономерностей распределения между ними генерируемого на поверхности трения теплового потока в процессе буксования и взаимного обмена накопленной дисками тепловой энергии. Приведены результаты исследования изменения температуры по толщине дисков, распределения между дисками генерируемого теплового потока на поверхностях трения и поглощения его слоями дисков. Расчеты выполнены применительно к фрикционам гидромеханической передачи БелАЗ. Показано влияние характеристик включения фрикциона на тепловую нагрузку дисков.

Ключевые слова:

гидромеханическая трансмиссия, многодисковый фрикцион, тепловой поток на поверхности трения, распределение температуры по толщине фрикционных дисков.

Abstract

The mathematical model of heat transfer has been developed for disk-type friction clutches, describing correctly the physical properties of contact disks, the distribution of heat flow between them, which is generated on the friction surface in the process of skidding, and the interchange of heat energy accumulated by the discs. The paper presents the results of studies of temperature changes over disks thickness, the distribution of the heat flow between discs, generated on friction surfaces, and its absorption by disc layers. The calculations were made for friction clutches of the BelAZ hydromechanical transmission. The effect of the characteristics of friction clutch engagement on the thermal load of discs is shown.

Key words:

hydromechanical transmission, multiple disc clutch, heat flow on the friction surface, temperature distribution over the thickness of friction discs.

На легковых автомобилях, карьерных самосвалах, строительно-дорожных машинах широкое применение находят гидромеханические передачи и преселективные коробки передач. Передачи в таких трансмиссиях переключают посредством многодисковых фрикционов, находящихся в общем корпусе с зубчатыми передачами и работающих в масляной среде. Прокачка масла между

дисками способствует их охлаждению, удаляет продукты износа с поверхностей трения и стабилизирует значение коэффициента трения. Для включения фрикционов используется гидропривод, что позволяет сравнительно легко решать проблему автоматизации управления переключением передач.

Пакет фрикционных дисков содержит диски с фрикционной накладкой

и высокоуглеродистые стальные диски (контртело). Фрикционную накладку изготавливают из металлокерамических или полимерных материалов с высоким значением коэффициента трения. Металлокерамическая накладка адгезионно закрепляется на поверхности несущего стального диска. Для краткости в дальнейшем диск с фрикционной накладкой будем называть фрикционным диском, а контртело – стальным диском.

При проектировании гидромеханической передачи необходимо иметь возможность прогнозирования максимально возможного нагрева её фрикционов на основе математического моделирования. Это позволит осуществить обоснованный выбор параметров фрикционов, обеспечивающих надежное их функционирование в экстремальных условиях работы мобильной машины.

Диски фрикциона при моделировании теплопередачи можно рассматривать как однородные изотропные тела, полагая в первом приближении постоянство их теплофизических параметров. Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье в этом случае имеет вид [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где T – температура, К; t – время, с; λ – коэффициент теплопроводности материала диска, Вт/(м · К); C – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг · К); ρ – плотность, кг/м³.

Для решения этого уравнения используется метод конечных элементов, или метод конечных разностей, реализованных в стандартных программных обеспечениях. При этом осуществляется дискретизация объёма диска, задаются граничные и начальные условия. Однако эти методы в инженерной практике при выполнении проектных работ не получили широкого применения. Это обусловлено прежде всего

сложностью корректной постановки задачи исследования и настройки программы расчета. Значительные затруднения вызывают вопросы закрепления объекта исследования и формирования граничных условий.

Проведенные расчетные исследования температуры в дисковых фрикционах методом конечных элементов показали, что различие значений температуры в радиальном направлении фрикционных дисков на порядок ниже, чем в осевом. Это обусловлено сравнительно небольшой разницей между внутренним и наружным радиусами поверхности трения дисков и высокой теплопроводностью материала дисков. Поэтому возникло решение разработать математическую модель одномерной теплопередачи в дисках фрикционов, доступную для использования в инженерной практике проектных работ.

В одномерном случае уравнение теплопроводности Фурье

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C\rho} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2)$$

При расчете температурных полей дисков фрикциона примем следующие допущения:

- поток тепловой энергии, генерируемой на поверхностях трения дисков в процессе буксования фрикциона, одномерный $\Phi(x, t)$ и равномерно распределен по поверхности трения;

- теплотехнические коэффициенты материалов пары трения не зависят от температуры;

- в связи с кратковременностью процесса буксования отдача теплоты в окружающую среду незначительна и ею можно пренебречь;

- при дискретизации дисков фрикциона представим их в виде плоских пластин конечной толщины, ограниченных двумя плоскостями $x = 0$ и $x = b/2$, где b – толщина диска;

- источник тепловой энергии на-

ходится в плоскости $x = 0$, а плоскость $x = b/2$ теплоизолирована.

Последнее допущение позволяет рассматривать только одну половину толщины каждого диска. На рис. 1 представлена предлагаемая модель дисков фрикциона для исследования одномерной теплопередачи. Линией AB отображена поверхность трения дисков. Вдоль оси $x_{\text{ст}}$ расположены пластины стального диска, а вдоль оси $x_{\text{МК}}$ – пластины фрикционного диска. Узлы дискретизации стального диска обозначены $1, 2, \dots, i, n$, фрикционного – $1', 2', \dots, i', m$, толщины дисков – $b_{\text{ст}}$ и

$b_{\text{МК}}$, толщины выделенных пластин соответствующих дисков – $h_{\text{ст}}$ и $h_{\text{МК}}$. Результаты предшествующих исследований [2] показывают, что значения толщин всех выделяемых пластин моделируемых дисков целесообразно принимать одинаковыми, т. е. $h_{\text{ст}} = h_{\text{МК}}$. Толщину поверхностных слоёв обоих дисков примем в два раза меньше, т. е. $h_{\text{ст}1} = h_{\text{ст}}/2$ и $h_{\text{МК}1} = h_{\text{МК}}/2$. Первые несколько слоев левой части модели на рис. 1 относятся к фрикционной накладке, а остальные – к несущей стальной основе фрикционного диска.

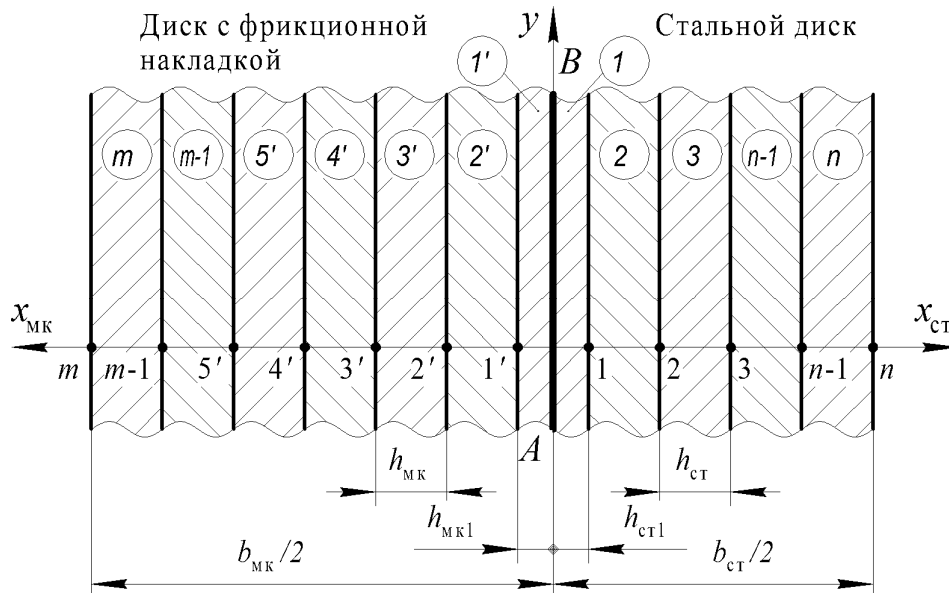


Рис. 1. Модель одномерной теплопередачи в дисках фрикциона

Для описания физических свойств одномерной дискретной модели дисков фрикциона выполним конечно-разностную аппроксимацию второй производной температуры T по толщине диска x в формуле (2):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = [T(x+h, t) - 2T(x, t) + T(x-h, t)]/h^2, \quad (3)$$

где h – шаг дискретизации по оси x .

Введём обозначения: $T(x+h, t) = T_{i+1}$; $T(x, t) = T_i$; $T(x-h, t) = T_{i-1}$, где i – номер узла дискретизации диска. Этот же номер присваивается и соответствующему слою диска. С учётом этих обозначений уравнение (3) приводится к виду

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = (T_{i-1} - T_i)/h_{i-1}^2 - (T_i - T_{i+1})/h_i^2.$$

Подставим $\partial^2 T / \partial x^2$ в уравнение

теплопроводности (2):

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\mu_{Ti-1}(T_{i-1} - T_i)}{c_{Ti}} - \frac{\mu_{Ti}(T_i - T_{i+1})}{c_{Ti}}, \quad i = \overline{2, n-1}, \quad (4)$$

где μ_{Ti} – коэффициент теплопроводности i -го слоя диска, Вт/К; c_{Ti} – теплоемкость i -го слоя диска, Дж/К.

Значения μ_{Ti} и c_{Ti} вычисляются по формулам:

$$\mu_{Ti} = \frac{\lambda_i V_i}{h_i^2} = \frac{\lambda_i A_i}{h_i}, \quad (5)$$

$$c_{Ti} = C_i \rho_i V_i = C_i \rho_i A_i h_i, \quad (6)$$

где V_i – объем i -го слоя диска, м³; A_i – площадь контактирующих поверхностей слоев в узлах дискретизации диска, м².

Умножим левую и правую части уравнения (4) на c_{Ti} . В результате получим уравнение баланса тепловых потоков i -го слоя диска:

$$\Phi_{ii} = \Phi_{Ti-1} - \Phi_{Ti}, \quad (7)$$

где Φ_{ii} – тепловой поток, поглощаемый i -м слоем диска, обеспечивающий приращение его температуры ΔT_i ; Φ_{Ti-1} – тепловой поток, поступающий в i -й слой из $(i-1)$ -го слоя, обеспечиваемый теплопроводностью $(i-1)$ -го слоя; Φ_{Ti} – тепловой поток, передаваемый из i -го слоя в $(i+1)$ -й слой (единица измерения теплового потока – ватт).

Компоненты уравнения (7) баланса тепловых потоков вычисляются по формулам:

$$\Phi_{ii} = c_{Ti} \frac{dT_i}{dt}; \quad (8)$$

$$\Phi_{Ti-1} = \mu_{Ti-1}(T_{i-1} - T_i); \quad (9)$$

$$\Phi_{Ti} = \mu_{Ti}(T_i - T_{i+1}). \quad (10)$$

Уравнение (8) по форме аналогично уравнению инерционного элемента механической системы, отображающего способность сосредоточенной массы накапливать кинетическую энергию при увеличении её скорости. Точно так же приращение температуры ΔT_i теплового элемента отображает его способность накапливать тепловую энергию.

Уравнения (9) и (10) по форме аналогичны уравнениям диссипативных элементов механической системы. Однако отображаемые ими свойства тепловых элементов существенно отличаются от свойств диссипативных элементов механической системы, потери энергии в которых обусловлены силами трения и возникают вследствие постоянного изменения знака относительной скорости деформации упругого элемента, сопровождаемой возникновением внутреннего трения. Причиной этих потерь является колебательный характер движения сосредоточенных масс, взаимодействующих между собой посредством упругих элементов. В тепловой системе аналог упругого элемента отсутствует, а теплота передаётся без потерь в одном направлении – от элемента с более высокой температурой к элементу с меньшей температурой. Потери тепловой энергии возможны только при отводе её во внешнюю среду.

Для моделирования теплопередачи в дисках фрикционов необходимо сформировать описание граничных условий на поверхности трения при $x = 0$ и в средней плоскости диска при $x = b/2$, которая считается теплоизолированной, согласно вышеизложенным допущениям.

При генерировании теплового потока на поверхности трения фрикционных дисков используем граничное условие III рода в следующем виде:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\Phi_{Bx}}{A_B} = 0, \quad (11)$$

где $\Phi_{\text{вх}}$ – тепловой поток на поверхности трения, направленный вдоль оси x , Вт; $A_{\text{в}}$ – площадь поверхности трения дисков, м^2 .

Аппроксимируем производную $\partial T/\partial x$ отношением конечной разности:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{T_1 - T_{\text{в}}}{h_1} = -\frac{\Phi_{\text{вх}}}{\lambda_1 A_{\text{в}}}. \quad (12)$$

Полагая в уравнении (4) $T_{i-1} = T_{\text{в}}$; $T_i = T_1$; $T_{i+1} = T_2$ и используя выражение (12), после простейших преобразований получаем следующее дифференциальное уравнение для определения температуры T_1 поверхностного слоя диска:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{\Phi_{\text{вх}} - \mu_{\text{т1}}(T_1 - T_2)}{c_{\text{т1}}}. \quad (13)$$

Уравнение граничного условия в средней плоскости диска при $x = b/2$ аналогично уравнению (11), но тепловой поток на границе $\Phi_{\text{вх}} = 0$. С учётом этого дифференциальное уравнение для определения температуры T_n теплоизолированного слоя n имеет вид:

$$\frac{dT_n}{dt} = \frac{2\mu_{\text{т}n-1}(T_{n-1} - T_n)}{c_{\text{т}n}}. \quad (14)$$

Уравнения (4), (13), (14) получены в [3, 4]. Для их использования необходимо предварительно определить функцию теплового потока на поверхности трения $\Phi(x, t)$. Эта функция соответствует функции мощности буксования фрикциона $P_{\text{бх}}(t)$, отнесённой к одной паре трения. Мощность буксования определяется в процессе моделирования переключения передачи на основе соответствующей математической модели. Примеры используемых моделей приведены в [2, 5, 6]. Вычисление мощности буксования фрикциона $P_{\text{ф}}(t)$ осуществляется по формуле

$$P_{\text{ф}}(t) = |M_{\text{ф}}(t)\omega_{\text{ф}}(t)|, \quad (15)$$

где $M_{\text{ф}}(t)$ – изменение во времени момента трения фрикциона, Н · м; $\omega_{\text{ф}}(t)$ – изменение относительной скорости скольжения фрикционных дисков, рад/с.

Функцию теплового потока на поверхности трения $\Phi(x, t)$ находят по формуле

$$\Phi(x, t) = P_{\text{ф}}(t)/z, \quad (16)$$

где z – количество пар трения фрикциона.

Текущие значения теплового потока на поверхности трения распределяются соответствующим образом между фрикционным и стальным дисками фрикциона. Для этого обычно используют известную формулу Шаррона–Чичинадзе [7]. Согласно этой формуле распределение теплового потока определяется только теплофизическими параметрами и плотностью материала дисков, а также коэффициентом перекрытия поверхностей трения. В результате коэффициенты распределения теплового потока $K_{\text{мк}} = \Phi_{\text{мк}}(t)/\Phi(x, t)$ и $K_{\text{ст}} = \Phi_{\text{ст}}(t)/\Phi(x, t)$ оказываются постоянными величинами для данного фрикциона (здесь $\Phi_{\text{мк}}(t)$ и $\Phi_{\text{ст}}(t)$ – тепловые потоки, поглощаемые соответственно фрикционным и стальным дисками). Анализируя опубликованные работы, выполненные с использованием этих формул, было обнаружено, что приведенные в них результаты как качественно, так и количественно отличаются от реальных характеристик протекания температурных полей в дисках фрикционов [3, 4, 6].

Согласно исследованиям авторов, распределение теплового потока, генерируемого на поверхности трения дисков в течение времени буксования фрикциона, претерпевает весьма существенные изменения. Всё определяется способностью обоих взаимодействующих дисков потреблять и передавать между слоями тепловую энергию и распределять накопленную дисками энергию ме-

жду собой, а это зависит не только от теплофизических параметров материала дисков, но и в значительной мере от их конструктивных особенностей.

В предлагаемой математической модели возникшая проблема решена путем корректного описания физических свойств обоих контактирующих дисков фрикциона на основе закономерностей распределения генерируемого на поверхностях трения теплового потока в процессе буксования и обмена накопленной дисками тепловой энергией между собой. Эти особенности отражаются представленной на рис. 1 моделью фрикционных дисков. В соответствии с этой моделью поверхность трения AB принадлежит одновременно слою стального диска толщиной $h_{ст1}$ и слою фрикционного диска $h_{мк1}$. Объединим эти слои в один и примем во внимание передачу тепловой энергии одновременно в оба диска. Тогда уравнение (13) преобразуется к следующему виду:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{\Phi_{вх} - \mu_{т.ст1}(T_1 - T_2) - \mu_{т.мк1}(T_1 - T_2')}{c_{т.ст1} + c_{т.мк1}}, \quad (17)$$

где $\mu_{т.ст1}$ и $\mu_{т.мк1}$ – коэффициенты теплопроводности первых слоёв стального и фрикционного дисков соответственно; $c_{т.ст1}$ и $c_{т.мк1}$ – теплоёмкости этих же слоёв.

Уравнения (17), (4) и (14) сводятся в единую систему дифференциальных уравнений, решение которых позволяет получить характеристики изменения во времени температуры в выделенных дискретных слоях фрикционных и стальных дисков в процессе буксования фрикциона, а также последующего периода времени выравнивания температуры всех слоев обоих дисков после его замыкания. Система уравнений включает одно уравнение (17), $n - 2$ уравнений (4) для определения температуры стального диска, $m - 2$ уравнений (4) для определения температуры фрикционного диска и два уравнения (14) для опреде-

ления температуры в срединных слоях стального и фрикционного дисков. В уравнения подставляются значения параметров μ_t и c_t в соответствии с материалом слоев дисков. Наличие масляных канавок, выполненных на поверхности трения фрикционной накладке, учитывается при вычислении $\mu_{т.мк}$ и $c_{т.мк}$ для слоёв фрикционного диска на глубине этих канавок путём умножения их значений на коэффициент перекрытия ψ .

Разработанная математическая модель использована для исследования теплопередачи в дисках фрикционных карьерного самосвала БелАЗ-7555Е. Наружный и внутренний радиусы поверхностей трения дисков этих фрикционов: $R_H = 122$ мм, $r_B = 98,5$ мм; толщина фрикционных накладок – 0,65 мм; глубина масляных канавок – 0,4 мм; толщина стальной основы фрикционного диска (контртело) – 2,6 мм; коэффициент перекрытия $\psi = 0,7$; количество пар трения $z = 18$. Фрикционная накладка – металлокерамическая марки МК-5. Её параметры: $\lambda_{мк} = 15,5$ Вт/(м·К); $c_{мк} = 638$ Дж/(кг·К); $\rho_{мк} = 6200$ кг/м³. Стальной диск и основа фрикционного диска изготовлены из стали 65Г со следующими параметрами: $\lambda_{ст} = 43,6$ Вт/(м·К); $c_{ст} = 510$ Дж/(кг·К); $\rho_{ст} = 7800$ кг/м³.

На рис. 2 приведены графики изменения во времени мощности P_{ϕ} и работы W_{ϕ} буксования фрикциона при трогании с места самосвала на первой передаче с полной нагрузкой в карьерных условиях. Время буксования фрикциона $t_6 = 0,425$ с. Во фрикционном диске при моделировании было выделено 26 слоёв, а в стальном – 13.

На рис. 3 приведены графики изменения температуры. Сплошными ли-

ниями изображены характеристики температуры стального диска, штриховыми – фрикционного. Обозначения номеров слоёв соответствуют рис. 1. Очевидна существенная разница в характеристиках нагрева дисков. Коэффициент теплопроводности стали $\lambda_{ст}$ в 2,813 раза выше, чем коэффициент теплопроводности металлокерамики, поэтому скорость передачи тепловой энер-

гии между слоями стального диска гораздо выше, чем фрикционного. В результате стальной диск нагревается более равномерно по сравнению с фрикционным. Следовательно, градиент температуры стального диска меньше, чем фрикционного. А градиент температуры определяет величину термических напряжений диска.

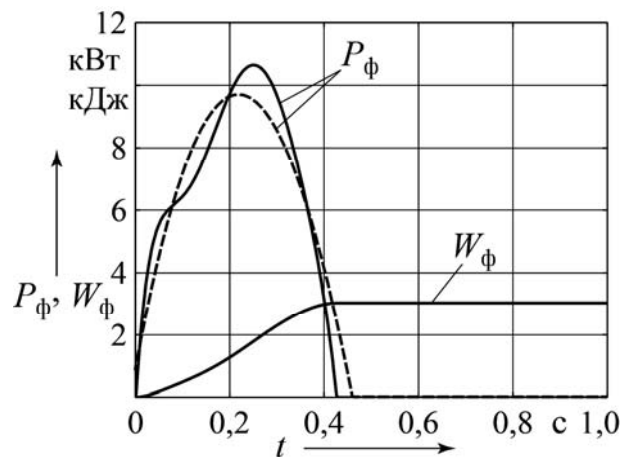


Рис. 2. Мощность и работа буксования фрикциона

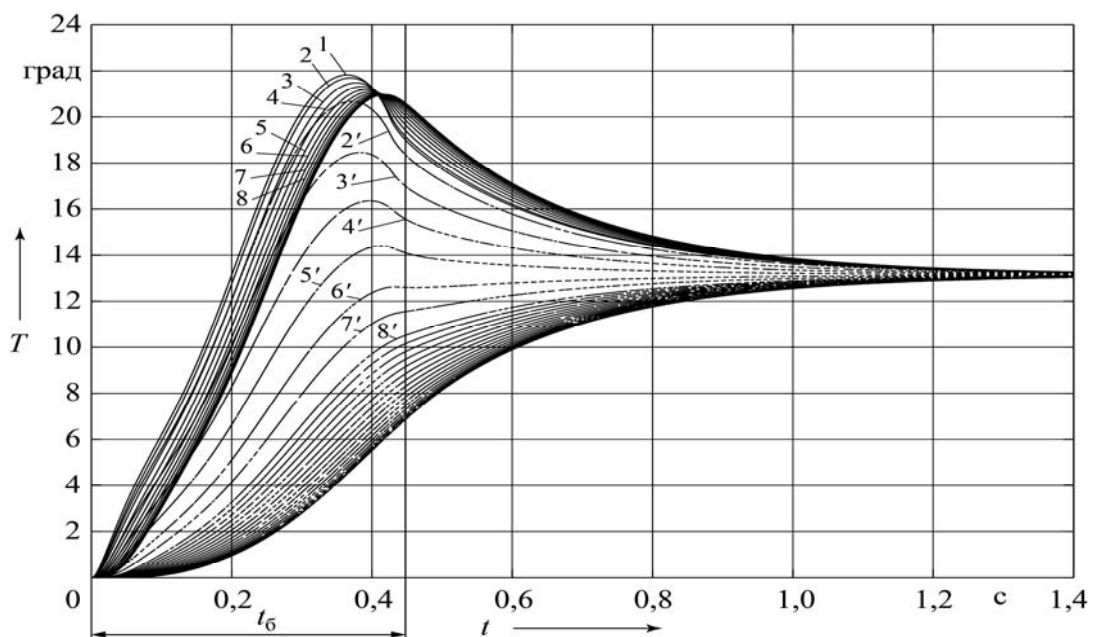


Рис. 3. Изменение температуры в слоях стального и фрикционного дисков в процессе буксования фрикциона

На рис. 4, *а* приведены графики изменения градиента температуры dT/dx стального диска, на рис. 4, *б* – фрикционного в различные моменты времени t процесса буксования фрикциона. Максимальные его значения для стального и фрикционного дисков достигаются в различные моменты времени. Величина градиента температуры фрикционного диска значительно выше, чем стального, что создаёт высокие термические напряжения и может при-

вести к отслаиванию фрикционной накладки от стальной основы диска. Ломаная линия его характеристики обусловлена различием параметров $\lambda_{\text{МК}}$ и $\lambda_{\text{СТ}}$ фрикционной накладки и стальной основы фрикционного диска, а также наличием масляных канавок, выполненных в четырёх первых слоях. Отметим, что градиент температуры дисков в процессе буксования фрикциона – отрицательная величина.

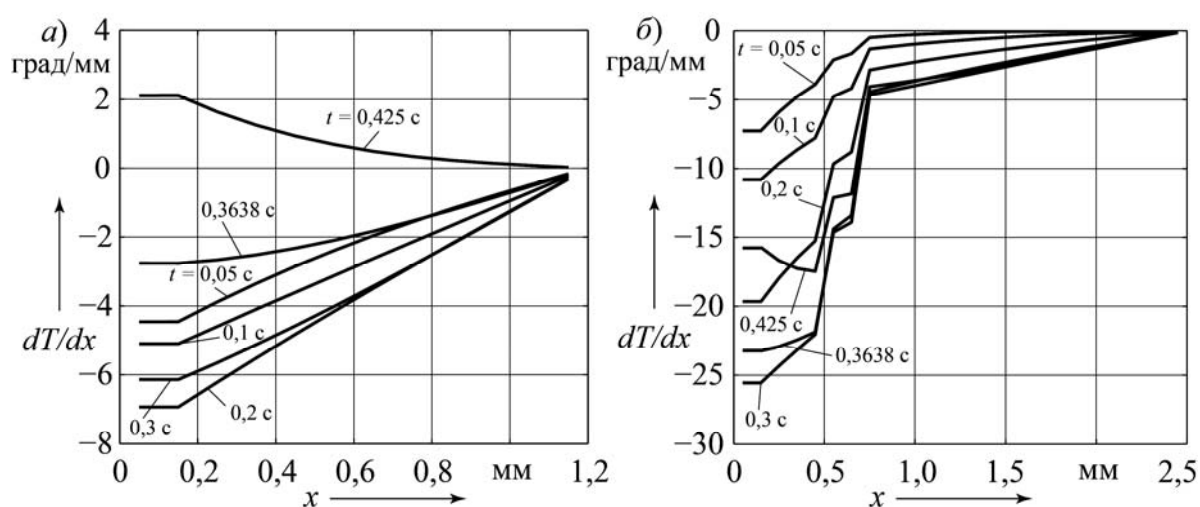


Рис. 4. Изменение градиента температуры стального (*а*) и фрикционного (*б*) дисков фрикциона

На рис. 5, *а* представлены графики распределения тепловых потоков между дисками фрикционов. Характеристика $\Phi_{\text{сум}}$ отображает изменение во времени теплового потока, генерируемого на поверхности трения, а характеристики $\Phi_{\text{СТ}}$ и $\Phi_{\text{МК}}$ – тепловых потоков, поглощаемых стальным и фрикционным дисками соответственно. После прекращения буксования, т. е. при $t \geq t_0$, тепловой поток стального диска становится отрицательным. Это означает, что тепловая энергия, накопленная стальным диском, начинает передаваться фрикционному диску. В результате температура в слоях обоих дисков постепенно выравнивается и по истечении некоторого

интервала времени оказывается одинаковой во всех слоях обоих дисков. В рассматриваемом примере при $t = 1,4$ с устанавливается температура 13,1 град.

На рис. 5, *б* показаны графики изменения коэффициентов распределения тепловых потоков $K_{\text{СТ}}$ и $K_{\text{МК}}$ между дисками фрикциона, вычисляемых по формулам:

$$K_{\text{СТ}} = \Phi_{\text{СТ}} / \Phi_{\text{сум}} ;$$

$$K_{\text{МК}} = \Phi_{\text{МК}} / \Phi_{\text{сум}} . \quad (18)$$

Из рис. 5, *а* и *б* видно, что в начальный период буксования фрикциона стальной диск поглощает значительно больший тепловой поток, чем фрикци-

онный. Но значение $K_{ст}$, характеризующее поглощение тепловой энергии стальным диском, с течением времени постепенно снижается, а $K_{мк}$ возрастает. После спада функции теплового потока $\Phi_{сум}$ значение $K_{мк}$ начинает быстро возрастать, а при $t \approx 0,4$ с весь ге-

нерируемый тепловой поток $\Phi_{сум}$ поглощается только фрикционным диском. Стальной диск при этом начинает отдавать накопленную избыточную тепловую энергию фрикционному диску, и тепловой поток $\Phi_{ст}$ становится отрицательным.

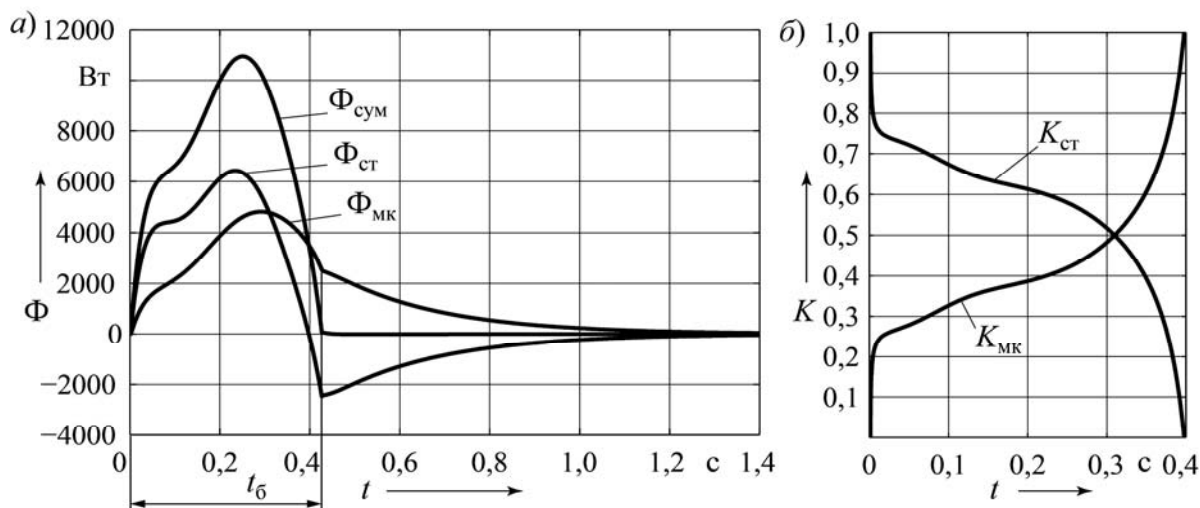


Рис. 5. Распределение между дисками теплового потока, генерируемого на поверхности трения

Температура дисков и градиент температуры также зависят от характеристик включения фрикционов, оказывающих непосредственное влияние на генерирование тепловой энергии на поверхности трения. На рис. 2 штриховой линией показана характеристика мощности трения $P_{ф}$ при более плавном нарастании усилия сжатия дисков фрикциона в начальный период включения, но при одинаковой суммарной работе трения $W_{ф}$ с исследуемым вариантом. В этом случае максимальная температура поверхностных слоёв обоих дисков оказывается ниже на один градус, а градиент температуры фрикционного диска – на 2 град/мм, т. е. почти на 10 % ниже. Следовательно, при проектировании системы управления фрикционами необходимо учитывать влияние её характеристик на тепловую нагруженность дисков.

На рис. 6 показаны характеристики изменения во времени тепловых потоков, поглощаемых слоями дисков. Графики на рис. 6, а и в соответствуют жёсткому процессу включения фрикциона, а графики на рис. 6, б и г – более мягкому. Колебательный характер изменения тепловых потоков при жёстком включении обусловлен переменной интенсивностью нарастания мощности трения $P_{ф}$ (см. рис. 2).

Для получения характеристик, представленных на рис. 6, необходимо в правых частях системы дифференциальных уравнений предложенной математической модели исключить деление на теплоёмкость $c_{т.ст i}$ и $c_{т.мк j}$ слоёв стального и фрикционного дисков соответственно.

Для оценки адекватности предложенной математической модели тепло-

передачи в дисках фрикционов сравним полученное значение приращения температуры ΔT после её выравнивания во всех слоях дисков со значением средней объёмной температуры нагрева дисков $\Delta T_{\text{ср}}$ за время включения фрикциона, вычисляемое по формуле [4]

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{ф}}}{\Sigma c_{\text{Т.СТ}} + \Sigma c_{\text{Т.МК}}}, \quad (19)$$

где $W_{\text{ф}}$ – работа трения фрикциона за

время буксования $t_{\text{б}}$, Дж; $\Sigma c_{\text{Т.СТ}}$ – суммарная теплоёмкость стальной составляющей обоих дисков; $\Sigma c_{\text{Т.МК}}$ – суммарная теплоёмкость фрикционной накладки.

Работа трения фрикциона $W_{\text{ф}}$ определяется по формуле

$$W_{\text{ф}} = \int_0^{t_{\text{б}}} \frac{P_{\text{ф}}(t)}{z} dt = \int_0^{t_{\text{б}}} \Phi_{\text{сум}} dt. \quad (20)$$

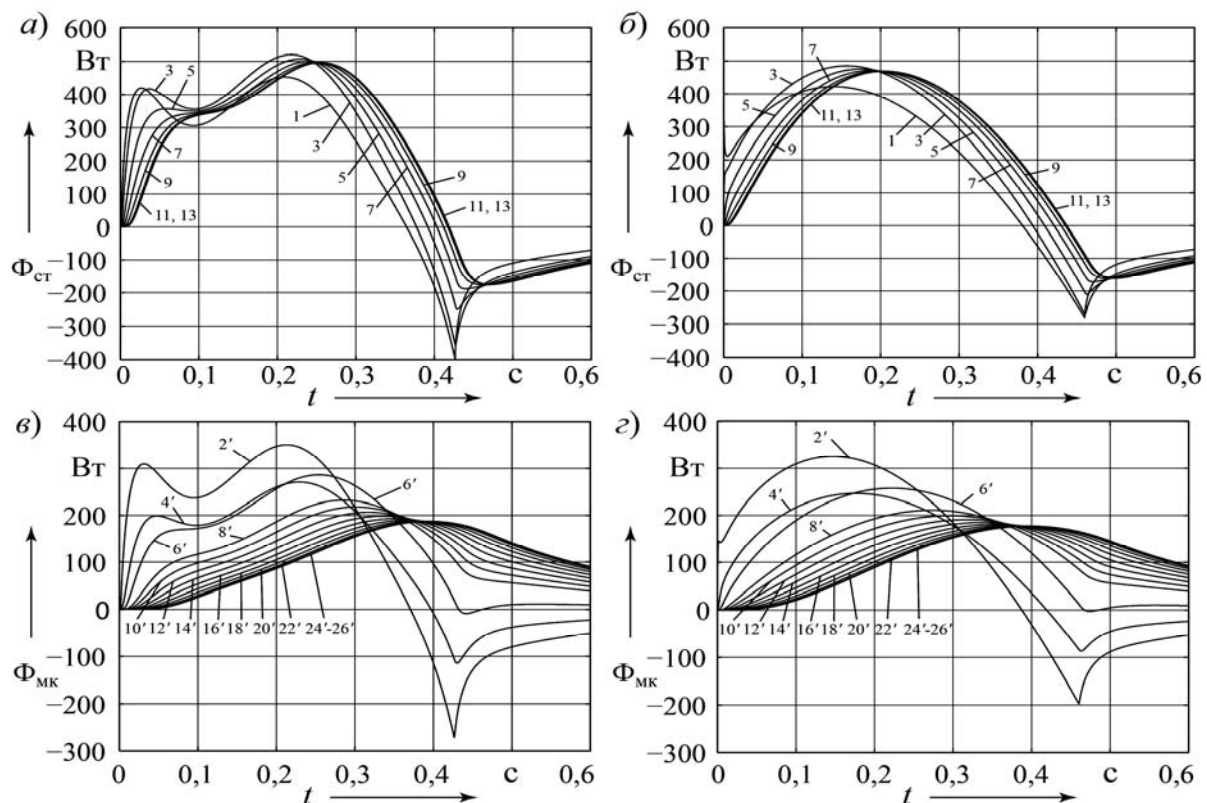


Рис. 6. Характеристики изменения во времени тепловых потоков, поглощаемых слоями дисков: а и в – при жёстком процессе включения фрикциона; б и г – при более мягком процессе

Величины $\Sigma c_{\text{Т.СТ}}$ и $\Sigma c_{\text{Т.МК}}$ вычисляются по формулам:

$$\Sigma c_{\text{Т.СТ}} = C_{\text{СТ}} \rho_{\text{СТ}} V_{\text{СТ}}^* / 2; \quad (21)$$

$$\Sigma c_{\text{Т.МК}} = C_{\text{МК}} \rho_{\text{МК}} V_{\text{МК}}^* / 2, \quad (22)$$

где $C_{\text{СТ}}, C_{\text{МК}}$ – удельные теплоёмкости стали и металлокерамической накладки

соответственно; $V_{\text{СТ}}^*, V_{\text{МК}}^*$ – суммарные объёмы стальной и металлокерамической составляющих обоих дисков.

Деление на два в формулах (21) и (22) необходимо в связи с тем, что в модели теплопередачи используются половинные толщины дисков. При определении $V_{\text{МК}}^*$ необходимо учесть объём масляных канавок, уменьшающих вели-

чину $V_{\text{МК}}^*$. При сопоставлении полученных результатов оказалось, что ΔT и $\Delta T_{\text{ср}}$ почти совпадают.

При использовании формулы Шаррона–Чичинадзе применяется модель теплопередачи, приведенная в [3, 4]. Значения коэффициентов распределения тепловых потоков в этом случае – $K_{\text{ст}} = 0,627$ и $K_{\text{МК}} = 0,373$. Максимальное значение температуры стального диска оказывается равным 24,45 град, фрикционного – 7,95 град. Конечные температуры при этом 23,47 и 7,50 град соответственно. Очевидно, что использованные в [3, 4, 6] математические модели некорректны. Они приводят к существенному искажению получаемых результатов.

Выводы

1. Разработана математическая модель теплопередачи в многодисковом фрикционе, обеспечивающая корректное описание физических свойств контактирующих дисков на основе закономерностей распределения генерируемого на поверхностях трения теплового

потока в процессе буксования, теплопередачи между слоями дисков и обмена накопленной обоими дисками пары трения тепловой энергией между собой.

2. В соответствии с предложенной моделью поверхность трения принадлежит одновременно поверхностным слоям фрикционного и стального (контртело) дисков, которые объединяются в один общий поверхностный слой. Это обеспечивает реальное распределение теплового потока между фрикционным и стальным дисками с учётом текущего потребления и передачи тепловых потоков всеми выделенными дискретными элементами дисков.

3. Обеспечивается равенство текущих значений поверхностной температуры обоих контактирующих дисков фрикциона и единство конечной температуры нагрева всех их слоёв после завершения процесса буксования фрикциона.

4. Предложенная модель отображает протекание переходного процесса теплопередачи и конечное стационарное состояние тепловой физической системы после завершения переходного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Минск : Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.
2. Тарасик, В. П. Моделирование процесса нагрева многодисковых фрикционов гидромеханической передачи / В. П. Тарасик, Ю. С. Романович, В. С. Савицкий // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 1 (34). – С. 107–117.
3. Тарасик, В. П. Фрикционные муфты автомобильных гидромеханических передач / В. П. Тарасик. – Минск : Наука и техника, 1973. – 320 с.
4. Ксенович, И. П. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет / И. П. Ксенович, В. В. Гуськов, В. П. Тарасик ; под общ. ред. д-ра техн. наук И. П. Ксеновича. – М. : Машиностроение, 1991. – 544 с.
5. Тарасик, В. П. Моделирование переключения передач автомобиля с гидромеханической передачей / В. П. Тарасик, Ю. С. Романович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 2. – С. 81–94.
6. Исследование механической и тепловой нагруженности фрикционов гидромеханической передачи / О. А. Шаповалова [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 2. – С. 15–20.
7. Барский, И. Б. Сцепления транспортных и тяговых машин / И. Б. Барский, Ф. Р. Геккер, В. М. Шарипов. – М. : Машиностроение, 1989. – 344 с.

Статья сдана в редакцию 30 июня 2015 года

Владимир Петрович Тарасик, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.
E-mail: avto@bru.mogilev.by

Vladimir Petrovich Tarasik, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: avto@bru.mogilev.by.

УДК 621.9.047:669:538.8

А. Л. Шеменкова, Ф. Г. Ловшенко, В. М. Шеменков

ВЛИЯНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НА СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ РЕЖУЩЕЙ ОКСИДНО-КАРБИДНОЙ КЕРАМИКИ

UDC 621.9.047:669:538.8

A. L. Shemenkova, F. G. Lovshenko, V. M. Shemenkov

EFFECT OF GLOW DISCHARGE ON THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF CUTTING OXIDE CARBIDE CERAMICS

Аннотация

Представлены результаты исследования структуры и фазового состава минералокерамики ВОК-60 в исходном состоянии и подвергнутой обработке в тлеющем разряде при различных его энергетических характеристиках. Установлено, что обработка тлеющим разрядом приводит к изменению размеров зерен карбидной фазы, формированию фазовых превращений и перераспределению элементов в поверхностном слое глубиной до 80 мкм.

Ключевые слова:

тлеющий разряд, минералокерамика, структура, фаза, модифицирование, рентгеноструктурный анализ.

Abstract

The article deals with the investigation of the structure and phase composition of WOK-60 mineral ceramics in the initial state and after being treated in a glow discharge with different energy characteristics. The results of the studies described in this article show that the glow discharge treatment results in changing the grain size of the carbide phase, the formation of phase changes and the redistribution of elements in the surface layer up to the depth of 80 microns.

Key words:

glow discharge, cemented-oxide ceramics, structure, phase, modification, X-ray structural analysis.

Введение

Одним из основных направлений развития современного машиностроения является постоянное повышение производительности, на которую в большей степени влияет скорость резания. Эффективность высокоскоростного резания в основном зависит от инструментов, изготовленных из материалов с высокими эксплуатационными свойствами. В последнее время широкое распространение при обработке резанием различных конструкционных материалов получили инструменты, оснащенные режущей керамикой, в частности

оксидно-карбидной, состоящей из Al_2O_3 и TiC .

Поверхностный слой в обеспечении износостойкости режущих инструментов играет определяющую роль. В настоящее время большое внимание уделяется разработке, развитию и совершенствованию различных методов модифицирования, к которым относится обработка тлеющим разрядом [1].

Целью работы являлось изучение влияния модифицирующей обработки тлеющим разрядом на структурные и фазовые превращения, протекающие в поверхностном слое оксидно-карбидной

керамики.

В качестве объекта исследования выбраны неперетачиваемые пластины треугольной формы по ГОСТ 25003-81 из режущей керамики ВОК-60 (ГОСТ 26630-85), что обусловлено необходимостью проведения комплексных исследований, заключающихся в том, что, наряду со структурой поверхностного слоя, в дальнейшем будет исследоваться износостойкость инструмента. Это позволит определить, каким образом структурные изменения в по-

верхностных слоях влияют на износостойкость керамики.

Методика исследования. Результаты исследования и их обсуждение

Для комплексного исследования структуры рабочей поверхности и для определения глубины модифицированного слоя многогранные пластины подверглись разрезанию по плоскости, нормальной к рабочей поверхности пластины (рис. 1).

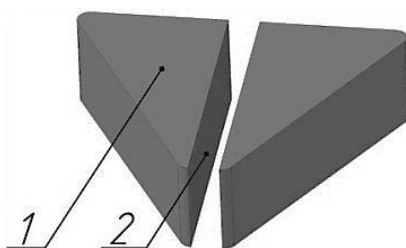


Рис. 1. Образцы, используемые для проведения исследований: 1 – рабочая поверхность пластины; 2 – поверхность разреза пластины

Проведенный металлографический анализ рабочих поверхностей пластин при помощи электронной сканирующей микроскопии с различным увеличением свидетельствует о том, что режущая оксидно-карбидная керамика является гетерогенным материалом, состоящим из оксида алюминия и карбида титана со средней площадью фрагментов, равной $2,5 \text{ мкм}^2$, а также металлической связки. Границы зерен карбидной фазы являются четкими, а зерна имеют сложную форму (рис. 2, а).

Обработка приводит к изменению площади зерен карбидной фазы, а именно: при обработке пластин с удельной мощностью горения тлеющего разряда W , равной $0,15 \text{ кВт/м}^2$, средняя площадь зерна составляет $1,5 \text{ мкм}^2$ (рис. 2, б), при $W = 0,50 \text{ кВт/м}^2$ – $3,0 \text{ мкм}^2$ (рис. 2, в), при $W = 0,90 \text{ кВт/м}^2$ – $2,5 \text{ мкм}^2$ (рис. 2, г).

Обработка в тлеющем разряде приводит к формированию размытых межфазных границ, что может объясняться наличием во время обработки минералокерамики в тлеющем разряде радиационно-инициируемой граничной и объемной диффузии, особенно при обработке пластин с удельной мощностью горения разряда $W = 0,9 \text{ кВт/м}^2$ (см. рис. 2, г). Размытость межфазных границ может свидетельствовать об образовании соединения по типу Al_4C_3 .

Величина модифицированного слоя измерялась по поверхности разреза пластин (см. рис. 1) на основе разницы фазовых контрастов модифицированных и необработанных участков.

На рис. 3 представлены наиболее характерные результаты исследований величины модифицированного слоя.

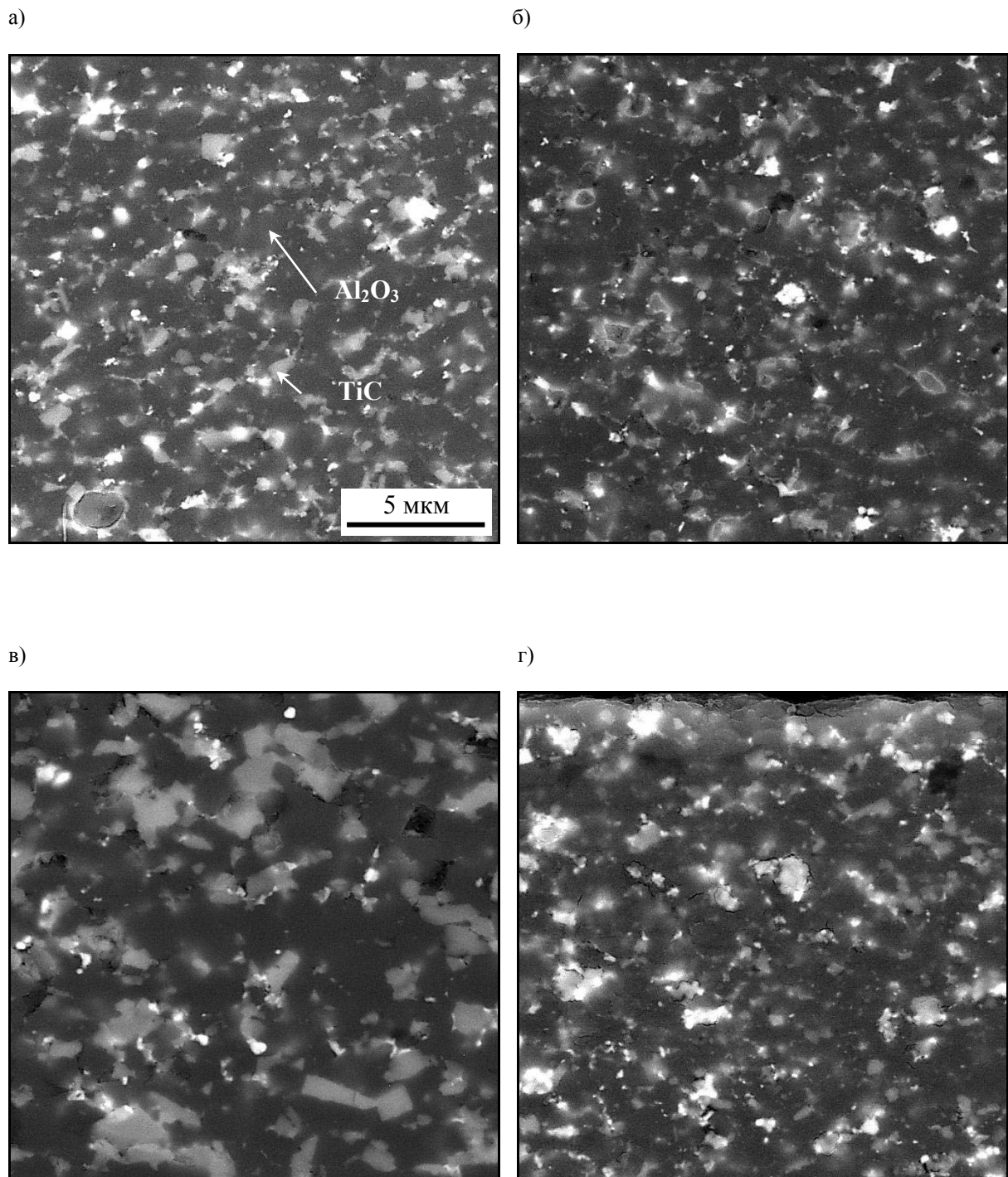


Рис. 2. Структура режущей керамики ВОК-60: а – в состоянии поставки; б – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения $0,15 \text{ кВт/м}^2$; в – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения $0,50 \text{ кВт/м}^2$; г – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения $0,90 \text{ кВт/м}^2$

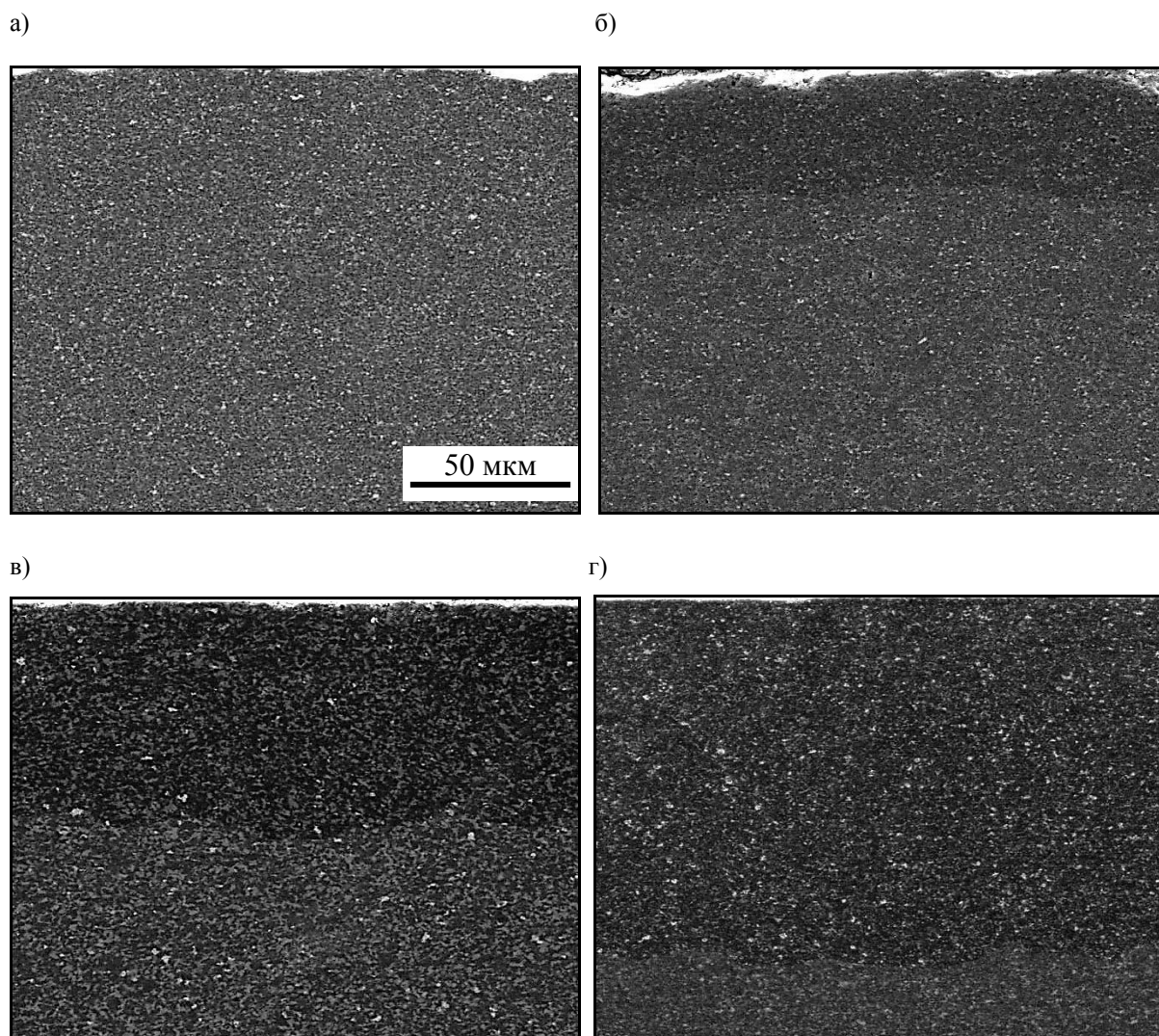


Рис. 3. Структура режущей керамики ВОК-60 по поверхности разреза пластины: а – в состоянии поставки; б – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения 0,15 кВт/м²; в – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения 0,50 кВт/м²; г – после обработки в тлеющем разряде с удельной мощностью горения 0,90 кВт/м²

Обработка результатов эксперимента позволила математически отразить зависимость глубины модифицированного слоя h_{Δ} , мкм, от удельной мощности горения разряда W , кВт/м², в виде степенной функции, а именно:

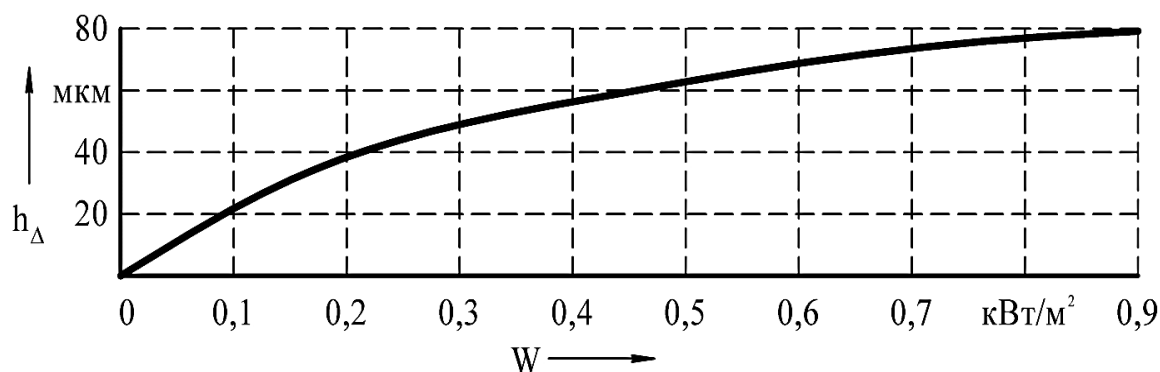
$$h_{\Delta} = k_W \cdot W^{m_W}, \quad (1)$$

где k_W – коэффициент, зависящий от материала, мкм·м³/(кВт/м^{3/2}). Для режущей керамики ВОК-60 на основании проведенных исследований $k_W = 80$; m_W – показатель степени, зависящий от материала. Для режущей керамики

ВОК-60 на основании проведенных исследований $m_W = 0,5$.

Тогда для режущей керамики ВОК-60 зависимость будет иметь следующий вид (рис. 4).

Необходимо отметить, что глубина модифицированного слоя для одной и той же удельной мощности горения разряда имеет различное значение по площади рабочей поверхности пластины, отличающееся от среднего на 10 %, что свидетельствует о нелинейности протекающих процессов во время модифицирующей обработки.

Рис. 4. Зависимость глубины модифицированного слоя h_{Δ} от удельной мощности горения разряда W

С целью получения информации о воздействии модифицирующей обработки на структуру отдельных составляющих режущей керамики проведено изучение дифракционных отражений карбида титана и оксида алюминия. Период решетки оценивался по результатам записи дифракционных линий соответствующих структурных составляющих, расположенных на дальних углах рассеяния, полученных при помощи автоматизированного рентгеновского комплекса на базе дифрактометра ДРОН-3М. Исследование проводилось в соответствии с методиками [2–4]. Фрагменты дифрактограмм представлены на рис. 5.

Рентгеновские исследования показали, что в состав исходного образца и образцов керамики, подвергнутых обработке разрядом с удельными мощностями горения 0,15 и 0,50 кВт/м², входят корунд Al_2O_3 (ромбоэдрическая кристаллическая решетка, пространственная группа $R-3c$, $a = 0,47592$ нм, $c = 1,2992$ нм, карточка PDF № 43-1484) и карбид титана TiC (кубическая гранцентрированная кристаллическая решетка, пространственная группа $Fm-3m$, $a = 0,43274$ нм, карточка PDF № 32-1383). Кроме этого, на рентгеновских дифрактограммах регистрируются слабые максимумы в диапазоне углов $2\theta = 32...38^\circ$, для идентификации которых необходимо точное знание химического состава

исследуемых образцов.

Образец керамики, подвергнутый обработке разрядом с удельной мощностью горения 0,90 кВт/м², кроме Al_2O_3 и TiC , содержит карбид алюминия Al_4C_3 , имеющий гексагональную кристаллическую решетку (карточка PDF № 50-0740).

Объемная доля TiC в исходном образце и образце, обработанном разрядом с удельной мощностью горения 0,15 кВт/м², составляет приблизительно 25 %, а в образцах, подвергнутых обработке разрядом с удельными мощностями горения 0,50 и 0,90 кВт/м², – 35 и 30 % соответственно (табл. 1). Параметры решетки оксида алюминия почти не зависят от вида обработки композита (см. табл. 1). В свою очередь, параметр решетки карбида титана в образце, обработанном тлеющим разрядом с удельной мощностью горения 0,50 кВт/м² ($a = 0,434$ нм), имеет повышенное значение по сравнению с параметром решетки карбидов в остальных образцах ($a = 0,432$ нм), что может быть объяснено проникновением азота в решетку карбида. Уширение дифракционных линий TiC вызвано микронапряжениями, т. к. отношение β_{420}/β_{111} пропорционально $\tan\theta_{420}/\tan\theta_{111}$.

Расчет параметров микронапряженного состояния (относительной среднеквадратичной микродеформации – ОСМД), плотности дислокаций и размеров областей когерентного рассеяния

(ОКР) проводился с помощью пакета компьютерных программ «Gor» [5]. Исследованию подвергались рентгено-

ские рефлексы (1 0 4) и (1 0 10) Al_2O_3 и (2 0 0) и (4 2 0) TiC (рис. 6).

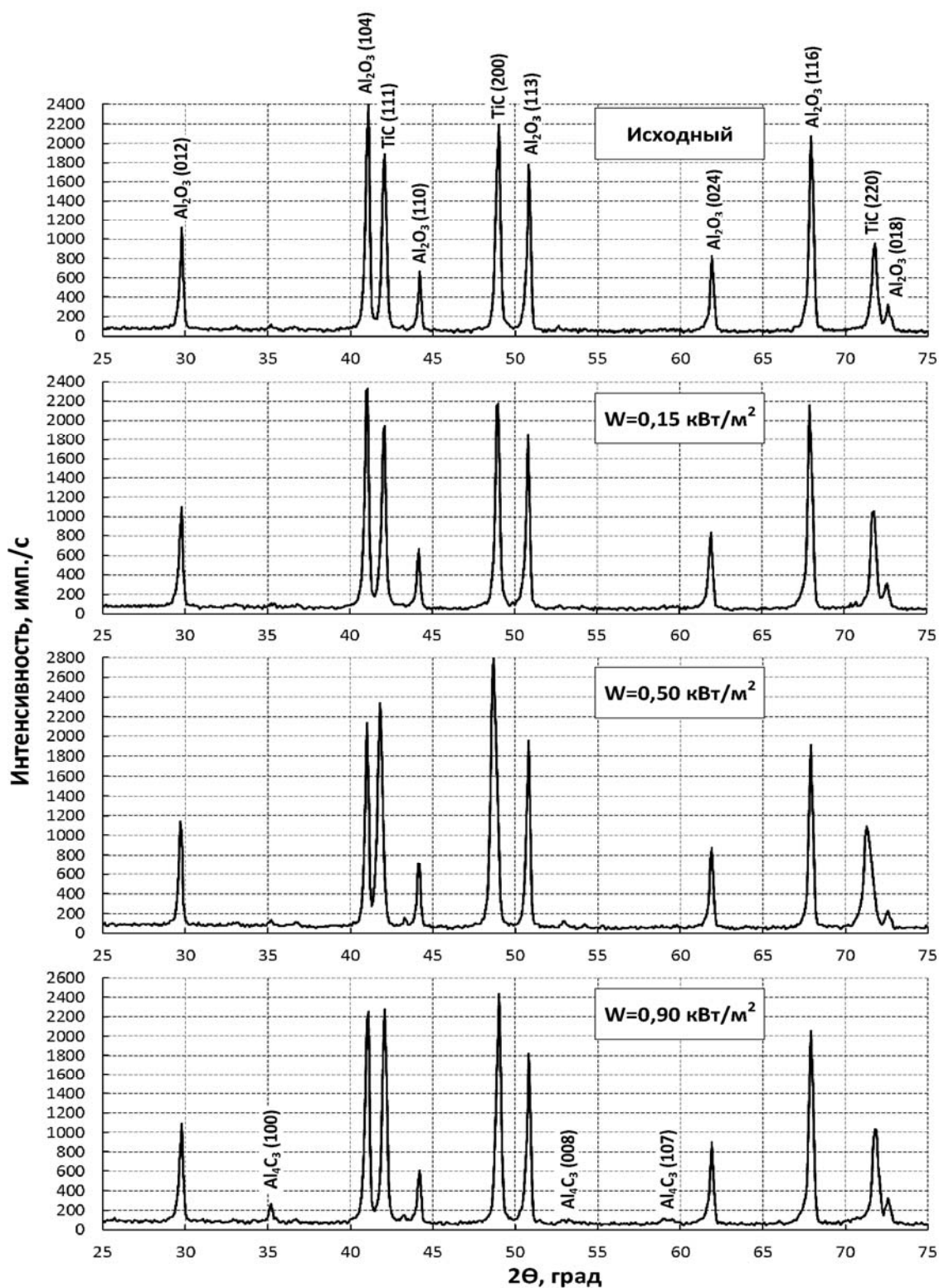


Рис. 5. Фрагменты дифрактограмм исходного образца режущей керамики ВОК-60 и образцов, подвергнутых обработке с различными удельными мощностями горения тлеющего разряда

Табл. 1. Параметры решетки и объемные доли фаз, входящих в состав минералокерамики

Образец	Объемные доли фаз, %		Параметры решетки, нм		
	Al ₂ O ₃	TiC	a (Al ₂ O ₃)	c (Al ₂ O ₃)	a (TiC)
Исходный	75	25	0,4760	1,2989	0,4321
W = 0,15 кВт/м ²	75	25	0,4760	1,2993	0,4320
W = 0,50 кВт/м ²	65	35	0,4759	1,2993	0,4340
W = 0,90 кВт/м ²	70	30	0,4759	1,2998	0,4318

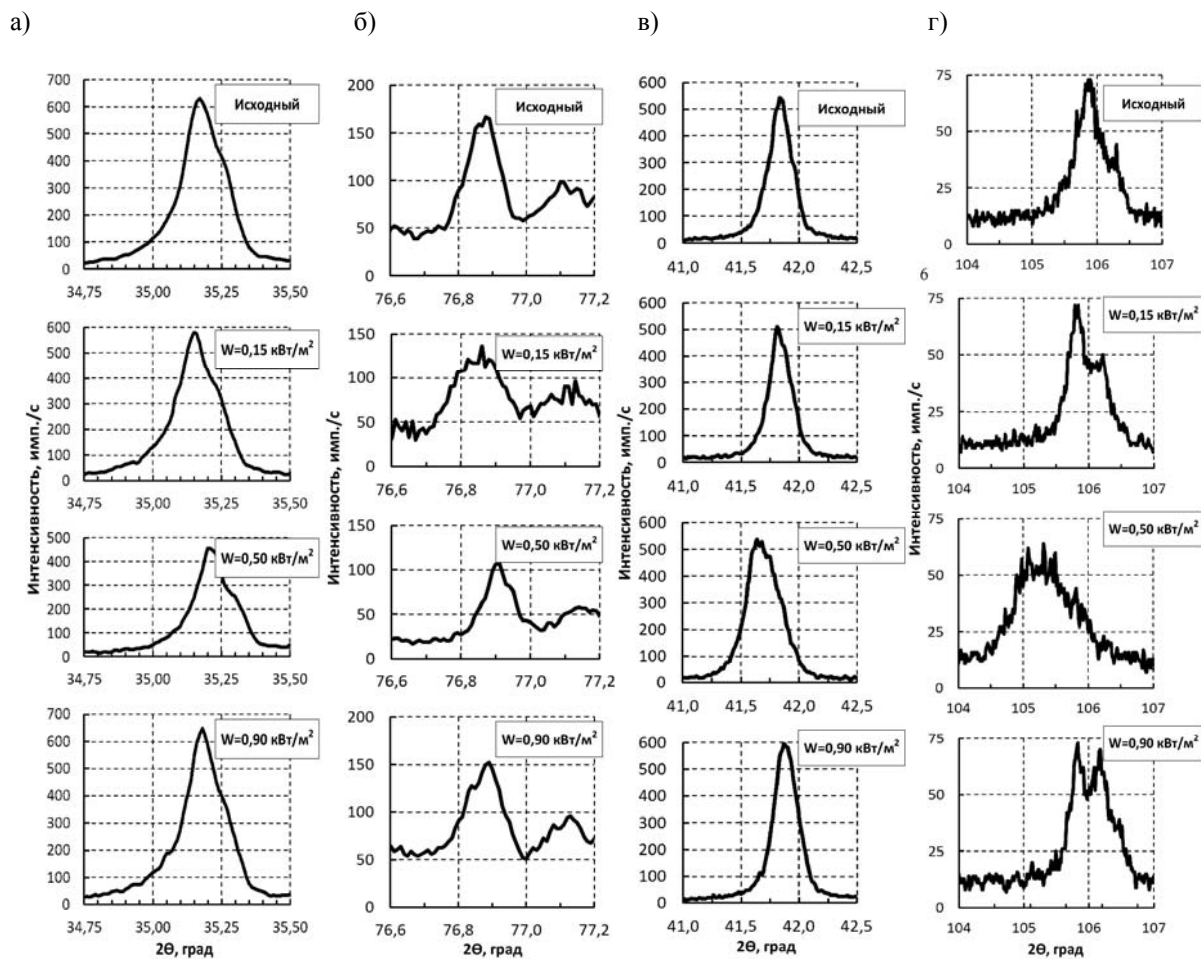


Рис. 6. Вид профиля линий исходного образца режущей керамики ВОК-60 и образцов, подвергнутых обработке с различными удельными мощностями горения тлеющего разряда: а – (1 0 4) Al₂O₃; б – (1 0 10) Al₂O₃; в – (2 0 0) TiC; г – (4 2 0) TiC

Как следует из рис. 6 и табл. 2, для разных кристаллографических направлений значения параметров тонкой структуры разнятся, параметры микронапряженного состояния как для Al₂O₃, так и для TiC изменяются в зависимости от энергетических характе-

ристик тлеющего разряда. Так, в исходном состоянии величина относительной среднеквадратичной микродеформации $\langle E^2 \rangle^{1/2}$ для Al₂O₃ составляет $(1,77...2,57) \cdot 10^{-4}$, а для TiC – $(4,12...11,12) \cdot 10^{-4}$.

Табл. 2. Параметры тонкой кристаллической структуры составляющих минералокерамики ВОК-60

Образец	Составляющая	(hkl)	Размер ОКР (D _{Эфф.} по Селякову), нм	ОСМД (по Селякову), ($\langle E^2 \rangle^{1/2}$) · 10 ⁻⁴	Плотность дислокаций × 10 ⁹ , 1/см ²	Интегральная ширина линии $\beta_{1/2}$, град
Исходный	Al ₂ O ₃	(1 0 4)	962 ± 16,977			
		(1 0 10)		2,15 ± 0,42	5,02	0,0489
	TiC	(2 0 0)	584 ± 20,192			
		(4 2 0)		7,62 ± 3,5	14,01	0,2893
W = 0,15 кВт/м ²	Al ₂ O ₃	(1 0 4)	521 ± 16,997			
		(1 0 10)		13,25 ± 6,27	21,54	0,3020
	TiC	(2 0 0)	325 ± 18,66			
		(4 2 0)		1,36 ± 0,27	2,43	0,0523
W = 0,50 кВт/м ²	Al ₂ O ₃	(1 0 4)	474 ± 15,772			
		(1 0 10)		1,14 ± 0,16	42,96	0,2621
	TiC	(2 0 0)	639 ± 18,669			
		(4 2 0)		6,66 ± 2,88	9,22	0,2539
W = 0,90 кВт/м ²	Al ₂ O ₃	(1 0 4)	564 ± 15,771			
		(1 0 10)		7,46 ± 2,68	12,86	0,1715
	TiC	(2 0 0)	1123 ± 17,441			
		(4 2 0)		13,04 ± 7,61	31,58	0,4959

Обработка образцов тлеющим разрядом с удельной мощностью горения 0,15 кВт/м² приводит к значительному росту плотности дислокаций в Al₂O₃ с $5,02 \cdot 10^9$ до $21,54 \cdot 10^9$ см⁻², а размер ОКР уменьшается до 503...538 нм по сравнению с исходным состоянием (945...979 нм), что объясняется измельчением структуры материала.

При обработке с данной энергией в TiC наблюдается значительное снижение плотности дислокаций с $14,01 \cdot 10^9$ до $2,43 \cdot 10^9$ см⁻², размер ОКР уменьшается до 306...344 нм по сравнению с исходным состоянием (564...604 нм), что может свидетельствовать об формировании блочно-фрагментированной структуры.

Похожая тенденция наблюдается и при обработке образцов тлеющим разрядом с удельной мощностью горения 0,5 кВт/м² с той лишь разницей, что размер ОКР TiC и плотность дислока-

ций незначительно изменяются по сравнению с исходным состоянием, что может свидетельствовать о том, что тлеющий разряд с указанным энергетическим параметром не оказывает значительного воздействия на карбид титана.

Обработка минералокерамики разрядом с удельной мощностью горения 0,9 кВт/м² также приводит к росту плотности дислокаций в Al₂O₃ до $12,86 \cdot 10^9$ см⁻² и уменьшению размера ОКР до 546...580 нм, что свидетельствует об измельчении структуры материала. Значительный рост размера ОКР (до 1105...1143 нм) и плотности дислокаций (до $31,58 \cdot 10^9$ см⁻²) в карбиде титана может объясняться протеканием в нем кристаллизационных процессов.

Заключение

Обработка режущей минералокерамики ВОК-60 в тлеющем разряде с различными энергетическими характеристиками приводит к формированию блочно-фрагментированной структуры карбидной фазы, твердого раствора карбида алюминия Al_4C_3 , имеющего гексагональную кристаллическую решетку, измельчению структуры оксида алюми-

ния. За счет радиационно-ускоренной диффузии происходит объемное и граничное перераспределение углерода.

Кроме этого, обработка приводит к изменению параметров кристаллической решетки карбида титана, которое может быть вызвано внедрением азота в решетку углерода, что, в свою очередь, вызывает изменение напряженного состояния карбида титана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ упрочнения изделий из металла или сплава, или сверхтвердого или графитсодержащего материала : пат. № 14716 ВУ, U C 21 D 1/78 / В. М. Шеменков, А. Ф. Короткевич ; заявитель Белорус.-Рос. ун-т, патентообладатель В. М. Шеменков. – № 20091136 ; заявл. 27.07.09 ; опубл. 10.05.11. – 3 с.
2. 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.
3. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учеб. пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : МИСИС, 2002. – 360 с. : ил.
4. Шеменкова, А. Л. Влияние тлеющего разряда на фазовый состав и микротвердость цементированной хромоникелевой стали 20ХН3А / А. Л. Шеменкова, Ф. Г. Ловшенко, В. М. Шеменков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 4. – С. 109–116.
5. Протасова, Н. А. Рентгенодифрактометрическое исследование тонкой структуры монокристаллических лопаток из никелевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. / Н. А. Протасова. – М., 1993. – 193 л.

Статья сдана в редакцию 30 июня 2015 года

Алла Леонидовна Шеменкова, инженер, ОАО «Могилевлифтмаш».

Федор Григорьевич Ловшенко, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел. +375-296-25-21-26.

Владимир Михайлович Шеменков, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел. +375-447-40-06-64.

Alla Leonidovna Shemenkova, engineer, JSC Mogilevliftmash.

Fedor Grigoryevich Lovshenko, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-296-25-21-26.

Vladimir Mikhailovich Shemenkov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-447-40-06-64.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.313.629.73

А. Г. Капустин, Н. С. Карнаухов

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМИ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

UDC 621.313.629.73

A. G. Kapustin, N. S. Karnauhov

PRINCIPLES OF CREATING DIGITAL CONTROL SYSTEMS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

Аннотация

Рассмотрены вопросы рационального выбора структуры цифровых систем электроснабжения воздушных судов. Приведен один из вариантов построения цифровой системы управления двухканальной автономной системы электроснабжения переменного тока постоянной частоты. Проанализированы задачи, решаемые цифровой системой управления на верхнем и нижнем уровнях.

Ключевые слова:

система электроснабжения, цифровая система управления, специализированная бортовая цифровая вычислительная машина, иерархическая структура, приемники электроэнергии, микропроцессор.

Abstract

Issues of a rational choice of the structure of power supply digital systems for aircraft are considered. One of the options of creating a digital control system for the two-channel autonomous system of constant frequency AC power supply is given. The tasks solved by a digital control system at the upper and lower levels are analyzed. The problems of rational choice framework of digital power supply systems of aircraft.

Key words:

power supply system, digital control system, specialized on-board digital computer, hierarchical structure, electric power receivers, microprocessor.

Последние достижения в разработке высоконадежных микроминиатюрных элементов и создание на их базе относительно недорогих микропроцессорных комплектов открывают широкие возможности использования цифровых систем управления (ЦСУ) в самолетных системах электроснабжения (СЭС) без ухудшения массогабаритных и экономических показателей, достигнутых в современной аналоговой аппаратуре. Применение ЦСУ позволяет на основе

анализа более полной информации о состоянии объекта и оптимизации процессов управления повысить эффективность решения всего комплекса функциональных задач и улучшить эксплуатационные характеристики СЭС [1–3].

Одной из проблем, возникающих при создании ЦСУ, является проблема рационального выбора ее структуры, которая во многом зависит от структуры и параметров объекта управления и состава решаемых функциональных задач.

Самолетные СЭС обладают рядом специфических особенностей, не позволявших непосредственно применять методы построения ЦСУ, разработанные для других систем авиационного оборудования. Высокая скорость протекания электромагнитных процессов в современных СЭС, большой объем измеряемой и анализируемой информации неизбежно приводят к необходимости использования многомашинных ЦСУ [3–5].

Принцип построения цифровых систем управления с распределенной архитектурой основывается на функциональной и топологической децентрализации. Функциональная децентрализация предполагает разбиение достаточно сложного общего процесса управления на ряд слабо связанных между собой подпроцессов с четко определенными способами взаимодействия. Под топологической децентрализацией

понимается пространственное распределение датчиков, устройств обработки информации и исполнительных устройств. Следует отметить, что для цифровой системы управления СЭС функционально оптимальная децентрализация системы практически совпадает с топологическим оптимумом.

Анализ структуры и особенностей работы СЭС, объема используемой информации и состава решаемых функциональных задач дает основание полагать, что для многоканальных СЭС оптимальной будет иерархическая структура ЦСУ, состоящая из уровней 1 и 2 (рис. 1). Такая структура предполагает наличие центральной специализированной бортовой цифровой вычислительной машины (СБЦВМ) на верхнем уровне 1 и периферийных цифровых управляющих устройств (ЦУУ) в подсистемах нижнего уровня 2.

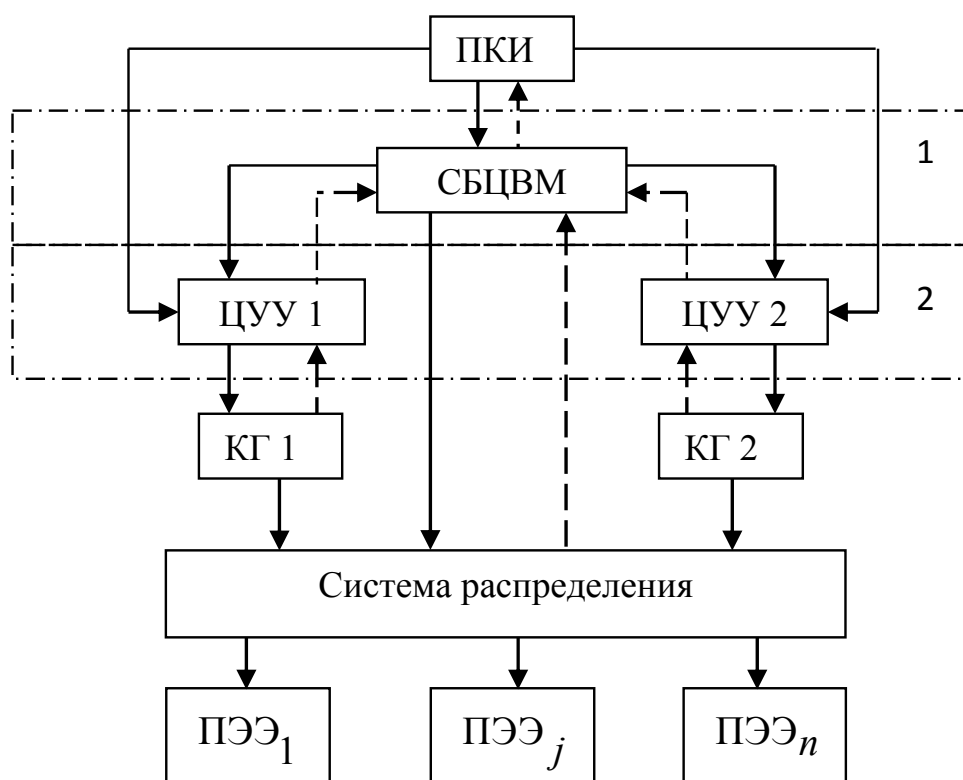


Рис. 1. Иерархическая структура ЦСУ, состоящая из уровней 1 и 2

На нижнем уровне 2 иерархии решаются задачи оперативного управления каналами генерирования (КГ): обеспечение требуемого качества электрической энергии при нормальном режиме работы; анализ технического состояния, диагностирование и защита системы генерирования. Эта информация отображается на пульте контроля и индикации (ПКИ). Указанные задачи требуют высокой частоты обмена информацией и используют информацию, локализованную в системе генерирования электрической энергии.

К задачам, решаемым на верхнем уровне 1 ЦСУ, относятся задачи управления СЭС в целом: автоматизация управления СЭС и приемниками электрической энергии (ПЭЭ) при всех режимах работы и полетных ситуациях; диагностирование технического состояния и защита системы распределения электрической энергии; контроль работоспособности СЭС и ЦСУ, а также отображение необходимой информации; прогнозирование технического состояния каналов генерирования (КГ).

Обычно в системах с распределенным управлением цифровые управляющие устройства (ЦУУ), решающие задачи нижнего уровня, координируются при помощи центральной СБЦВМ. Поскольку в рассматриваемой структуре координирующая СБЦВМ освобождена от функций управления каналами генерирования, то ее операционная система существенно упрощается. Таким образом, распараллеливание процесса обработки информации позволяет не только повысить быстродействие ЦСУ, но и снизить затраты на подготовку математического обеспечения. Причем последний фактор приобретает в настоящее время весьма существенное значение, так как стоимость разработки матема-

тического обеспечения может достигать 70...80 % от стоимости создания всей ЦСУ [4, 5].

При указанной функциональной и топологической децентрализации цифровой системы управления СБЦВМ решает в основном логические задачи и оперирует с дискретной информацией, что определяет относительно невысокие требования к частоте обмена информацией $f_{\Pi} = 5...10$ Гц. В этом случае требуемое быстродействие защиты системы распределения электрической энергии обеспечивается за счет ввода информации в систему прерываний СБЦВМ.

Так как периодичность и длительность решения задач верхнего уровня достаточно малы, то СБЦВМ может быть комплексно использована для управления другими системами авиационного оборудования, не требующими высокого быстродействия ЦСУ. При применении для связи с объектом телемеханической системы управления на СБЦВМ целесообразно возложить функции кодирования, декодирования и распределения информации [2, 4, 5].

Значительно более жесткие требования предъявляются к цифровым управляющим устройствам, используемым для оперативного управления каналами генерирования электрической энергией. Необходимость обеспечения максимального быстродействия цифровых управляющих устройств оказывает существенное влияние на их структуру. Один из вариантов построения цифрового устройства управления, состоящего из цифрового вычислительного устройства (ЦУУ) и устройства связи с объектом управления, приведен на рис. 2.

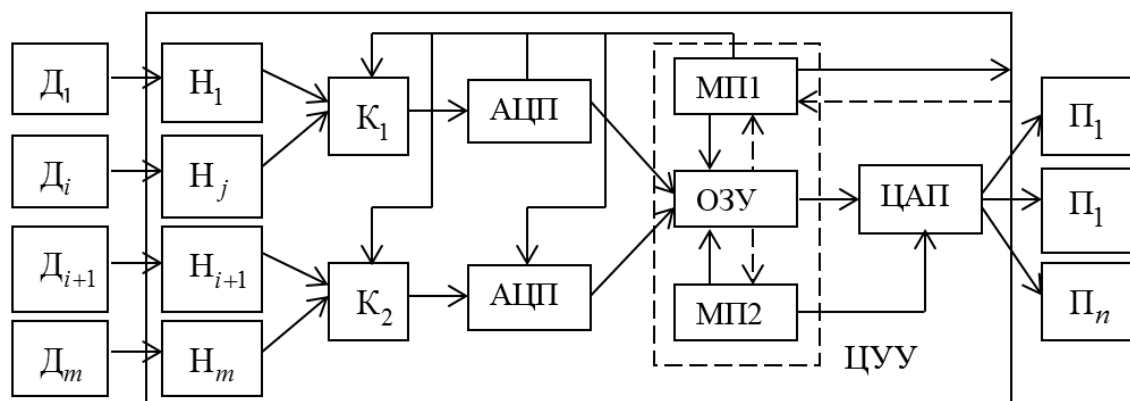


Рис. 2. Цифровое управляющее устройство (ЦУУ): МП1, МП2 – микропроцессоры; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; $\Pi_1 \dots \Pi_n$ – приемники электроэнергии; первичные преобразователи информации: $D_1 \dots D_m$ – датчики; $H_1 \dots H_m$ – нормализаторы; K_1, K_2 – коммутаторы; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – преобразователь цифрового кода в аналоговую информацию

Применение методов цифрового управления в каналах генерирования электрической энергии предполагает решение широкого круга функциональных задач, требующих точного измерения большого количества физически разнородных величин. В то же время необходимо создать достаточно простую ЦСУ, имеющую высокие массогабаритные показатели [4].

Эффективность цифровых устройств управления каналами генерирования во многом определяется рациональностью построения устройств связи с объектом, характеристики которых выбираются на основании тщательного анализа процессов управления. Учитывая существующие требования к качеству электрической энергии, можно полагать, что допустимая погрешность измерения напряжения и частоты не должна превышать 0,5 %, а длительность цикла измерения выходных координат при прямом цифровом регулировании быть не более 5 мс.

Следует отметить, что ряд требуе-

мых характеристик может быть обеспечен как путем применения более совершенной аппаратуры, так и путем рационального выбора структуры измерительной части устройства связи с объектом. Относительно высокая сложность измерительных преобразователей предполагает использование минимального количества АЦП, которые образуют централизованную измерительную систему, обслуживающую ряд микропроцессоров (МП1 и МП2), предназначенных для решения отдельных функциональных задач [5].

На микропроцессор МП1 целесообразно возложить функции управления работой устройств связи с объектом, предварительную обработку информации и реализацию алгоритмов защиты канала генерирования от недопустимых отклонений напряжения и частоты. Тогда микропроцессор МП2 сможет обеспечить эффективное решение задач прямого цифрового регулирования выходных координат системы.

При разработке цифровых управ-

ляющих устройств, используемых для оперативного управления каналами генерирования электрической энергии, необходимо существенное внимание уделить организации процесса ввода измеряемой информации. Большой объем анализируемой информации и высокая скорость протекания электромагнитных переходных процессов делают нецелесообразным применение системы ввода информации с прерыванием вычислений, приводящее к нерациональному использованию вычислительного потенциала процессора. Следовательно, в цифровых устройствах управления каналами генерирования электрической энергии, отличающихся высокой частотой обмена информацией, желательно обеспечить возможность прямого ввода информации в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Анализ современного уровня развития средств вычислительной техники показывает, что при использовании микропроцессорных управляющих комплексов реализация этого требования не вызовет существенных затруднений [4, 5].

Один из вариантов построения ЦСУ двухканальной автономной СЭС переменного тока постоянной частоты приведен на рис. 3.

Цифровые устройства (ЦУУ1, ЦУУ2) решают задачи оперативного управления каналами генерирования (КГ1, КГ2) путем обработки информации об изменениях выходных координат системы: U_A , U_B , U_C – напряжения фаз генераторов; I_A , I_B , I_C – фазные токи генераторов; $U_{вв}$ – напряжение возбуждения возбудителей ге-

нераторов; Ω – выходные частоты вращения приводов постоянной скорости и по заданным алгоритмам формируют управляющие сигналы, вводимые в регуляторы напряжения (РН1, РН2) и регуляторы частоты (РЧ1, РЧ2). Информация о техническом состоянии каналов генерирования электрической энергии, получаемая в результате анализа текущих значений выходных координат, передается в СБЦВМ верхнего уровня иерархической структуры ЦСУ.

Центральная СБЦВМ осуществляет управление СЭС в двух режимах: автоматическом (в зависимости от условий полета и технического состояния отдельных элементов СЭС); по командам, вводимым экипажем с пульта управления (ПКУ).

Для обеспечения быстродействующей защиты системы распределения электрической энергии в СБЦВМ вводится информация от установленных в ней датчиков, а в систему распределения передаются сигналы управления коммутационными устройствами. Кроме того, в СБЦВМ поступает информация о техническом состоянии выпрямительных установок (ВУ) и аккумуляторных батарей (АБ), которая используется для управления работой указанных устройств.

Итак, рассмотренный подход к построению цифровых систем управления самолетными СЭС является наиболее приемлемым, поскольку он учитывает «технологическое» единство процессов производства, распределения и потребления электрической энергии и обеспечивает эффективное решение комплекса задач, возлагаемых на ЦСУ [2].

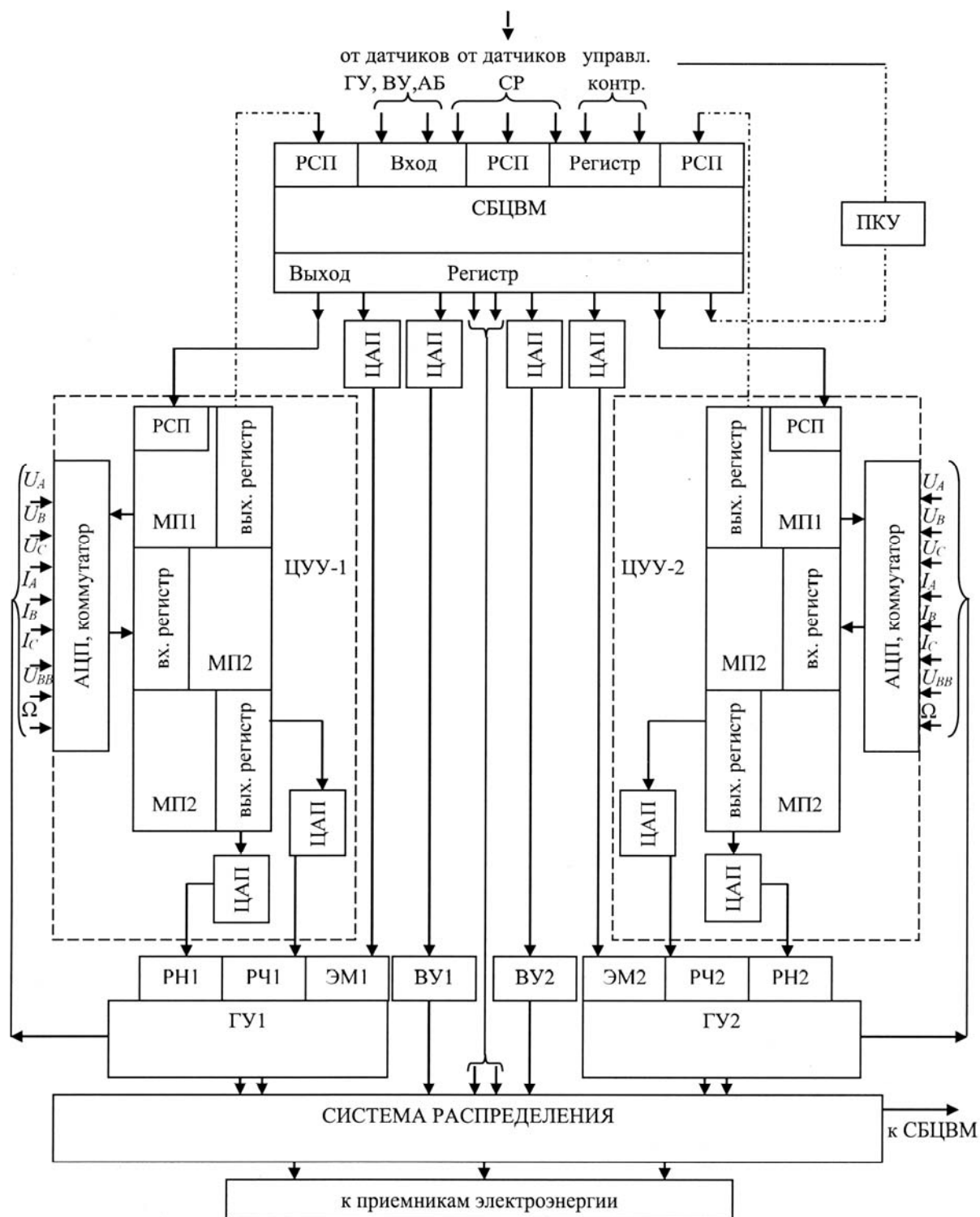


Рис. 3. ЦСУ двухканальной СЭС переменного тока постоянной частоты

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Капустин, А. Г.** Анализ свойств системы электроснабжения с цифровой системой управления / А. Г. Капустин // Совершенствование обеспечения полетов авиации : материалы 4-й Военно-науч. конф. курсантов и молодых ученых. – Минск : МГВАК, 2013.
2. **Карнаухов, Н. С.** Цифровой алгоритм полной компенсации возмущений в статическом режиме работы автономной системы электроснабжения / Н. С. Карнаухов, А. Г. Капустин // Совершенствование обеспечения полетов авиации : материалы 4-й Военно-науч. конф. курсантов и молодых ученых. – Минск : МГВАК, 2013.
3. **Карнаухов, Н. С.** Перспективные направления повышения показателей качества электроэнергии первичных систем электроснабжения воздушных судов / Н. С. Карнаухов // Академические жуковские чтения : материалы Всероссийской науч.-практ. конф. – Воронеж : Военно-воздушная акад. им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2013.
4. **Капустин, А. Г.** Цифровое управление перспективными автономными системами электроснабжения / А. Г. Капустин // Совершенствование обеспечения полетов авиации : материалы 5-й Военно-науч. конф. курсантов и молодых ученых. – Минск : МГВАК, 2014.
5. **Капустин, А. Г.** Применение ЦВМ в перспективных автономных системах электроснабжения / А. Г. Капустин // Совершенствование обеспечения полетов авиации : материалы 5-й Военно-науч. конф. курсантов и молодых ученых. – Минск : МГВАК, 2014.

Статья сдана в редакцию 4 апреля 2015 года

Александр Григорьевич Капустин, канд. техн. наук, доц., Белорусская государственная академия авиации. Тел.: +375-295-71-42-58.

Николай Сергеевич Карнаухов, курсант, Белорусская государственная академия авиации. E-mail: Karnauhov_07@mail.ru.

Aleksandr Grigoryevich Kapustin, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State Aviation Academy. Phone: +375-295-71-42-58.

Nikolai Sergeyevich Karnaukhov, cadet, Belarusian State Aviation Academy. E-mail: Karnauhov_07@mail.ru.

УДК 62-83:621

А. С. Коваль, Н. С. Лагун, В. В. Кабушева

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛИФТА НА БАЗЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

UDC 62-83:621

A. S. Koval, N. C. Lagun, V. V. Kabusheva

TRANSFER FUNCTIONS OF THE ELEVATOR ELECTROMECHANICAL SYSTEM ON THE BASIS OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Аннотация

Для электромеханической системы безредукторного электропривода лифтов получены передаточные функции по основным регулируемым координатам. Показано, что при синтезе систем управления безредукторным электроприводом лифтов на базе синхронного двигателя на постоянных магнитах возможно использование одномассовой расчетной схемы без учета влияния упругих свойств канатов.

Ключевые слова:

лифт, упругие свойства канатов, переходные процессы в электромеханической подсистеме лифта, передаточные функции, трехмассовая расчетная схема, постоянная времени, безредукторный электропривод, синхронный двигатель на постоянных магнитах, частота резонанса, колебательное звено.

Abstract

Transfer functions for the basic regulated conditions have been obtained for the electromechanical system of gearless electric drive of elevators. It is shown that in the synthesis of control systems of the gearless electric drive on the basis of a permanent magnet synchronous motor, a one-mass design model can be used without taking into account the effect of elastic properties of cables.

Key words:

elevator, elastic properties of cables, transient processes in the elevator electromechanical subsystem, transfer functions, three-mass design model, time constant, gearless electric drive, permanent magnet synchronous motor, resonance frequency, oscillatory element.

В настоящее время основным типом применяемого электропривода в массовых лифтах остается редукторный электропривод на базе двухскоростного асинхронного двигателя. Растет и применение частотно-регулируемого редукторного электропривода в лифтах в связи с постоянным увеличением требований по экономической эффективности электрооборудования, используемого в жилищно-коммунальных хозяйствах городов. Дальнейшим раз-

витием этой тенденции является внедрение безредукторного привода лифтов в зданиях жилого и коммерческого назначения.

Безредукторные электроприводы пассажирских и грузовых лифтов строятся на базе тихоходных асинхронных двигателей и синхронных двигателей с постоянными магнитами, причем последние получают наибольшее распространение.

Безредукторный электропривод с

синхронным двигателем с постоянными магнитами можно представить в виде электрической и механической подсистем [1]. Электрическая подсистема образована собственно двигателем и системой управления с силовым преобразователем. Механическая подсистема в зависимости от кинематической схемы крепления кабины лифта может иметь различное исполнение, но с достаточной точностью описывается консервативной трехмассовой расчетной схемой, уравнения движения которой имеют вид [2, 3]:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} + M_{13}; \\ J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} + M_2; \\ J_3 \cdot \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{13}; \\ \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2); \\ \frac{dM_{13}}{dt} = C_{13} \cdot (\omega_3 - \omega_2), \end{cases} \quad (1)$$

где J_1, J_2, J_3 – приведенные к общему валу моменты инерции двигателя, кабины лифта, противовеса соответственно, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – приведенные к общему валу угловые скорости двигателя, кабины лифта, противовеса соответственно, рад/с ; M – электромагнитный момент двигателя, $\text{Н} \cdot \text{м}$; M_{12}, M_{13} – приведенные к общему валу моменты взаимодействия, $\text{Н} \cdot \text{м}$; C_{12}, C_{13} – коэффициенты жесткости при кручении связей, $\text{Н} \cdot \text{м/рад}$.

Значения коэффициентов жесткости при растяжении определяются по формуле

$$C_j = \frac{n \cdot S \cdot E \cdot R^2}{L_j \cdot i^2}, \quad (2)$$

где C_j – коэффициенты жесткости при растяжении соответствующей ветви, Н/м ; n – число канатов в ветви; S – поперечное сечение каната, м^2 ; E – модуль

упругости стального каната, МПа ; R – радиус канатопроводящего шкива, м ; i – передаточное число редуктора; L_j – длина соответствующей ветви каната.

Электрическая подсистема безредукторного электропривода лифта (без учета силового преобразователя) образована трехфазным синхронным двигателем с постоянными магнитами, который в осях $d-q$ описывается системой уравнений (для поверхностного расположения магнитов) [3]

$$\begin{cases} U = i_1 \cdot R_1 + \frac{d\psi_{1q}}{dt} + c \cdot \omega; \\ M = c \cdot i_1; \\ \psi_{1q} = L_1 \cdot i_{1q}; \\ M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \end{cases}$$

где L_1 – индуктивность фазы статора; c – конструктивная постоянная двигателя; J – момент инерции двигателя.

Электромеханической системе безредукторного электропривода лифта, описываемой уравнениями (1), соответствует нормированная структурная схема (рис. 1) [4].

Здесь

$$W_1(p) = \frac{1}{T_3 \cdot p}; \quad W_2(p) = \frac{1}{T_{np} \cdot p};$$

$$W_3(p) = \frac{1}{T_M \cdot p}; \quad W_4(p) = \frac{1}{T_1 \cdot p};$$

$$W_5(p) = \frac{1}{T_K \cdot p}; \quad W_6(p) = 1;$$

$$W_0(p) = \frac{k}{T_\Theta \cdot p + 1};$$

$$T_1 = \frac{B}{C_{12}}; \quad T_3 = \frac{B}{C_{13}}; \quad T_M = \frac{J_1}{B};$$

$$T_K = \frac{J_2}{B}; \quad T_{np} = \frac{J_3}{B}; \quad T_\Theta = \frac{L_1}{R_1}.$$

Особенности многомассовых электромеханических систем удобно

исследовать при использовании разветвленной структурной схемы, позволяющей наглядно оценить поведение

каждой координаты [5]. Для трехмассовой расчетной схемы разветвленная структурная схема имеет вид (рис. 2).

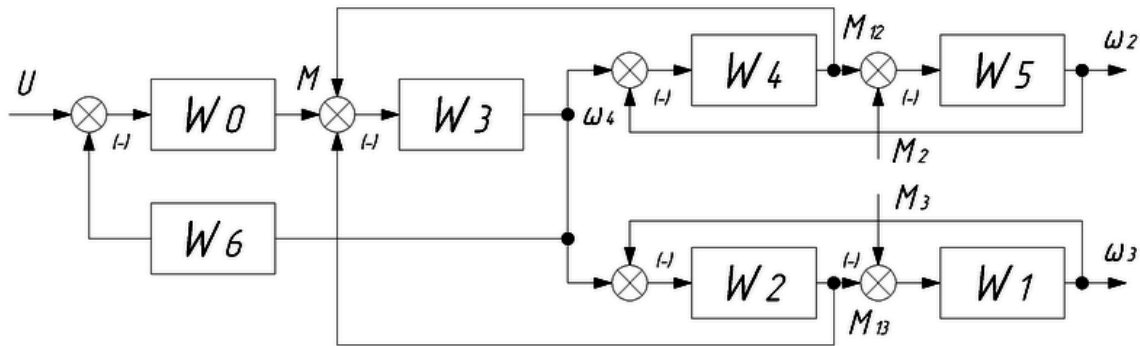


Рис. 1. Структурная схема нормированной трехмассовой консервативной системы

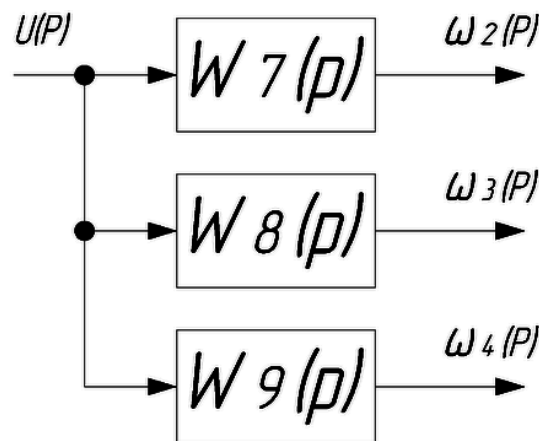


Рис. 2. Разветвленная структурная схема электромеханической системы безредукторного ЭП лифтов ($M_2 = M_3 = 0$)

Передаточные функции $W_7(p)$, $W_8(p)$, $W_9(p)$ на разветвленной структурной схеме по каждой координате исходной схемы могут быть получены с помощью правила преобразования

структурных схем Мейсена [4].

Передаточная функция $W_7(p)$ с учетом обозначений W_1 , W_2 , W_3 , W_4 , W_5 , W_6 , W_0 преобразуется следующим образом:

$$W_7(p) = \frac{B_2 \cdot p^2 + B_0}{p^6 + A_5 \cdot p^5 + A_4 \cdot p^4 + A_3 \cdot p^3 + A_2 \cdot p^2 + A_1 \cdot p + A_0},$$

где

$$B_2 = \frac{k}{T_1 \cdot T_K \cdot T_\Theta \cdot T_M}; \quad B_0 = \frac{k}{T_1 \cdot T_K \cdot T_\Theta \cdot T_M \cdot T_3 \cdot T_{пр}};$$

$$A_0 = \frac{k}{T_1 \cdot T_K \cdot T_{\Theta} \cdot T_M \cdot T_3 \cdot T_{\text{пр}}}; \quad A_1 = \frac{1}{T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_1} \cdot \left(\frac{1}{T_K \cdot T_M} + \frac{1}{T_3 \cdot T_M} + \frac{1}{T_K \cdot T_3} \right);$$

$$A_2 = \frac{1}{T_1 \cdot T_{\text{пр}}} \cdot \left(\frac{1}{T_K \cdot T_M} + \frac{1}{T_3 \cdot T_M} + \frac{1}{T_K \cdot T_3} \right) + \frac{k}{T_M \cdot T_{\Theta}} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{пр}} \cdot T_3} + \frac{1}{T_K \cdot T_1} \right); \quad A_5 = \frac{1}{T_{\Theta}};$$

$$A_3 = \frac{1}{T_3 \cdot T_1} \cdot \left(\frac{1}{T_M} + \frac{1}{T_K} \right) + \frac{1}{T_3 \cdot T_{\text{пр}}} \cdot \left(\frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_M} \right);$$

$$A_4 = \frac{1}{T_1} \cdot \left(\frac{1}{T_M} + \frac{1}{T_K} \right) + \frac{1}{T_{\text{пр}}} \cdot \left(\frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_M} \right) + \frac{k}{T_{\Theta} \cdot T_M}.$$

Передаточная функция по скорости перемещения противовеса $W_8(p)$ имеет вид:

$$W_8(p) = \frac{\Pi_2 \cdot p^2 + \Pi_0}{p^6 + A_5 \cdot p^5 + A_4 \cdot p^4 + A_3 \cdot p^3 + A_2 \cdot p^2 + A_1 \cdot p + A_0},$$

где

$$\Pi_2 = \frac{k}{T_3 \cdot T_{\text{пр}} \cdot T_{\Theta} \cdot T_M}; \quad \Pi_0 = B_0.$$

Передаточная функция по частоте вращения двигателя $W_9(p)$ определяется как

$$W_9(p) = \frac{D_4 \cdot p^4 + D_2 \cdot p^2 + D_0}{p^6 + A_5 \cdot p^5 + A_4 \cdot p^4 + A_3 \cdot p^3 + A_2 \cdot p^2 + A_1 \cdot p + A_0},$$

где

$$D_4 = \frac{1}{T_{\Theta} \cdot T_M}; \quad D_2 = \frac{1}{T_M \cdot T_{\Theta}} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{пр}} \cdot T_3} + \frac{1}{T_K \cdot T_1} \right); \quad D_0 = B_0.$$

Постоянные времени, используемые в этих передаточных функциях для безредукторного пассажирского лифта

грузоподъемностью 400 кг и скоростью движения 1 м/с, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения постоянных времени и коэффициентов

k	T_{Θ} , с	T_1 , с	T_3 , с	T_K , с	$T_{\text{пр}}$, с	T_M , с
0,56	0,014	0,00003	0,00077	0,072	0,058	0,006

При этих постоянных времени, например, передаточная функция по

скорости кабины $W_7(p)$ может быть записана следующим образом:

$$W_7(p) = \frac{5,43 \cdot 10^9 \cdot p^2 + 1,339 \cdot 10^{14}}{p^6 + 71,4 \cdot p^5 + 6,28 \cdot 10^6 \cdot p^4 + 4,48 \cdot 10^8 \cdot p^3 + 2,62 \cdot 10^{11} \cdot p^2 + 1,83 \cdot 10^{13} \cdot p + 1,3 \cdot 10^{14}}.$$

На рис. 3 для нее показаны ЛАЧХ и ЛФЧХ.

ны ЛАЧХ и ЛФЧХ для передаточных функций $W_8(p)$, $W_9(p)$.

Аналогично могут быть построе-

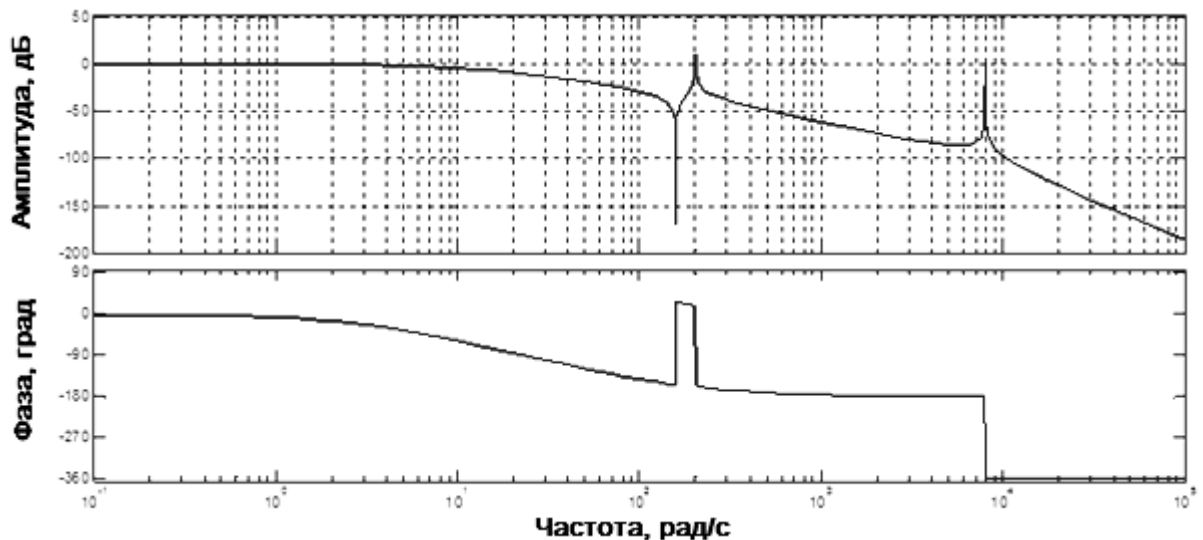


Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточной функции $W_7(p)$

Упругие свойства канатов определяют частоту свободной составляющей переходных процессов, а также частоты резонансов и антирезонансов. Эти частоты резонансов и антирезонансов могут быть рассчитаны аналитически по соответствующим нулям и полюсам $W_7(p)$, $W_8(p)$, $W_9(p)$.

Старшие коэффициенты в полиномах числителя и знаменателя передаточных функций $W_7(p)$, $W_8(p)$, $W_9(p)$, определяемые произведениями соответствующих постоянных времени, имеют достаточно маленькие значения. При их пренебрежении (без учета упругих свойств канатов) передаточная функция, например $W_7(p)$, приводится к виду

$$W_7'(p) = \frac{1}{T_{\Sigma} \cdot T_0 \cdot p + T_0 \cdot p + 1},$$

где

$$T_0 = \frac{T_K + T_M}{k}.$$

Для безредукторного электропривода лифтов (см. табл. 1) выполняется условие $T_0 \geq 4T_{\Sigma}$. Соответственно $W_7'(p)$ может быть представлена в виде двух аperiodических звеньев:

$$W_7'(p) = \frac{1}{(T_1^* \cdot p + 1) \cdot (T_2^* \cdot p + 1)}.$$

T_1^* , T_2^* определяются корнями характеристического полинома знамена-

теля $W_7'(p)$.

Для постоянных времени (см. табл. 1) получим

$$W_7'(p) = \frac{1}{(0,12p+1) \cdot (0,02p+1)}.$$

Переходные процессы в безредукторном приводе лифта с учётом упругих свойств канатов и без их учета показаны на рис. 4.

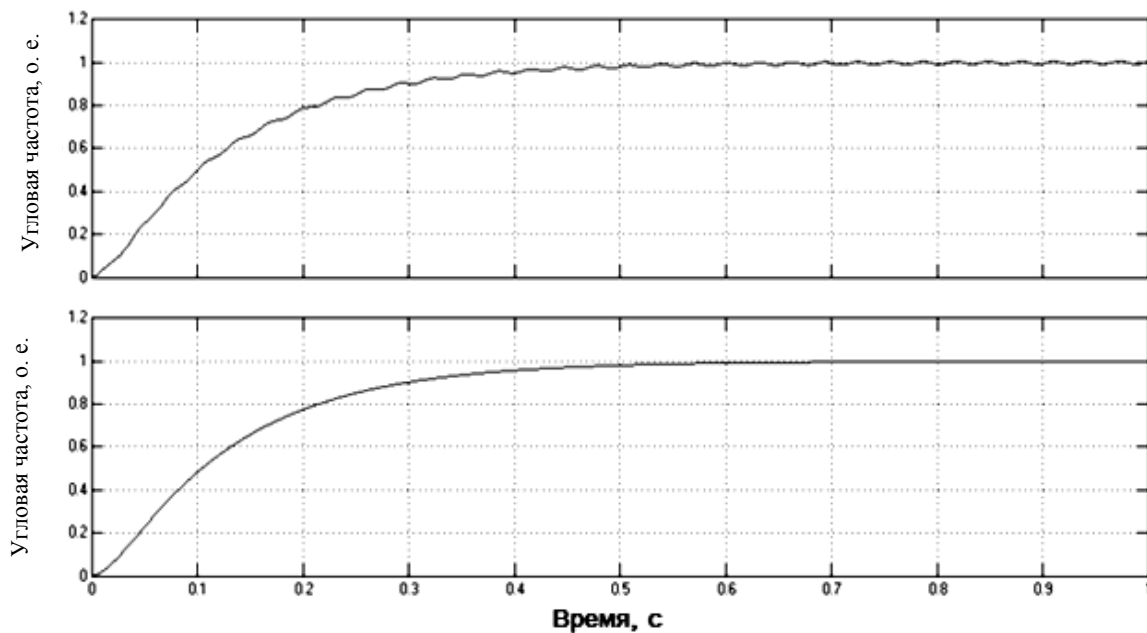


Рис. 4. Переходные процессы (угловая частота кабины лифта, приведенная к валу двигателя) в электромеханической системе безредукторного электропривода лифта

Подобные преобразования без учета упругих свойств канатов могут быть сделаны для передаточных функций $W_8(p)$, $W_9(p)$.

Искусственное обнуление старших коэффициентов характеристического полинома в замкнутых системах (использование полинома второго порядка при синтезе системы привода лифта) может приводить к нарушению устойчивости системы при малых изменениях ее параметров (нарушение грубости второго рода). В передаточных функциях $W_7(p)$, $W_8(p)$, $W_9(p)$ все коэффициенты определяются в том числе постоянными времени T_1 , T_3 , T_k , которые изменяются при изменении высоты подъема кабины и загрузки в ней. Поэтому использование представления безредукторного электропривода лифта с син-

хронным двигателем с постоянными магнитами в виде двух апериодических звеньев или полинома второго порядка (при невыполнении условия $T_0 \geq 4T_3$) при синтезе регуляторов системы привода требует проверки получаемого характеристического полинома замкнутой системы на робастную устойчивость [6].

Выводы

1. На основе трехмассовой расчетной схемы, описывающей механическую подсистему привода лифтов, получены передаточные функции по скорости кабины лифта, скорости противовеса, частоте вращения двигателя. Эти передаточные функции определяют вынужденную и свободную составляющие скорости перемещения кабины лифта и могут быть использованы при синтезе системы

регулирования привода лифта, например, полиномиальными методами.

2. При анализе параметров системы электропривода лифтов, а также при синтезе регуляторов привода возможно использование одномассовой модели

механической подсистемы привода лифта с последующей проверкой синтезированной замкнутой системы на устойчивость (нарушение грубости второго порядка).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коваль, А. С.** Электромеханическая система лифтов со скоростью до 2 м/с / А. С. Коваль, А. В. Шваяков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 113–120.
2. **Чупрасов, В. В.** Исследование динамики электроприводов лифтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / В. В. Чупрасов ; Моск. энергет. ин-т. – М., 1976. – 19 с.
3. **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов / Б. И. Фираго. – Минск : Техноперспектива, 2012. – 639 с.
4. **Борцов, Ю. А.** Тиристорные системы ЭП с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергия, 1979. – 159 с.
5. **Переслегин, Н. Г.** Синтез систем управления электроприводами многомассовых механизмов с упругими связями. Автоматизированный электропривод / Н. Г. Переслегин ; под ред. Н. Ф. Ильинского, М. Г. Юнькова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 544 с.
6. Использование метода полиномиальных управлений для синтеза систем управления асинхронными электроприводами / З. Ш. Ишматов [и др.] // Электротехника. – 2004. – № 9. – С. 29–33.

Статья сдана в редакцию 20 мая 2015 года

Александр Сергеевич Коваль, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.
E-mail: etf@bru.by.

Никита Станиславович Лагун, магистрант, Белорусско-Российский университет.

Виктория Викторовна Кабушева, магистрант, Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Sergeyevich Koval, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.
E-mail: etf@bru.by.

Nikita Stanislavovich Lagun, MSc student, Belarusian-Russian University.

Viktoriya Viktorovna Kabusheva, MSc student, Belarusian-Russian University.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 534.86

В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин

ТОНКАЯ СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КРУГЛЫХ ПЬЕЗОПЛАСТИН

UDC 534.86

V. I. Borisov, S. S. Sergeev, A. S. Nikitin

FINE STRUCTURE OF THE ACOUSTIC FIELD OF RADIATION OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS ON THE BASIS OF CIRCULAR PIEZOELECTRIC CRYSTAL PLATES

Аннотация

Теоретически и экспериментально исследовано акустическое поле излучения круглых пьезопластин. Показано, что в ближней зоне оно носит неоднородный характер с наличием большого количества минимумов и максимумов. Наблюдается качественное соответствие между теоретическими и экспериментальными результатами.

Ключевые слова:

неразрушающий контроль, акустическое поле, пьезопреобразователь, пьезопластина, излучатель, дальняя зона, ближняя зона.

Abstract

An acoustic field of the radiation of circular piezoelectric crystal plates has been investigated both theoretically and experimentally. It is shown that in near-field zone the acoustic field has a nonuniform nature with a large number of minimums and maximums. A qualitative correspondence between theoretical and experimental results is observed.

Key words:

nondestructive testing, acoustic field, piezoelectric transducer, piezoelectric crystal plate, radiation source, far-field zone, near-field zone.

Методы акустического неразрушающего контроля на сегодняшний день самые распространенные при дефектоскопии технических изделий и материалов как в процессе производства, так и при эксплуатации. При этом одной из важнейших характеристик, влияющих на информационные возможности и достоверность контроля, является акустическое поле используемых пьезо-

преобразователей. При расчете акустического поля пьезопреобразователей аналитическое решение удастся получить лишь для точек, расположенных на акустической оси круглой пьезопластины [1]. Для пьезопластин другой формы также получены удовлетворительные аналитические выражения, описывающие акустическое поле в дальней зоне [1–3].

Приведены результаты численного анализа акустического поля излучения круглых пьезопластин в режиме непрерывного возбуждения волн. Расчет акустического поля проводился способом,

изложенным в [4].

Расчетная схема пьезопреобразователя в виде круглой пластинки радиусом R_0 и площадью S представлена на рис. 1.

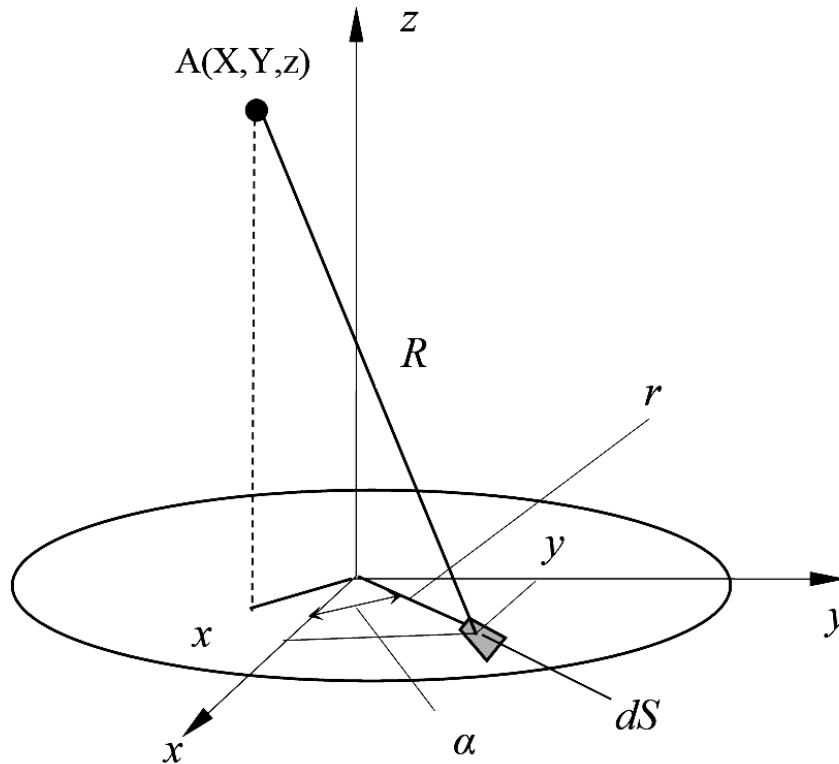


Рис. 1. Схема для расчета акустического поля круглого пьезопреобразователя

Результирующая сила давления в точке A с координатами X, Y, z будет определяться следующей суммой:

$$F(X, Y, z) = P_0 \Delta r \Delta \alpha \times \sqrt{\left(\sum_0^N \frac{rz}{R^2} \cos \frac{2\pi}{\lambda} R \right)^2 + \left(\sum_0^N \frac{rz}{R^2} \sin \frac{2\pi}{\lambda} R \right)^2}, \quad (1)$$

где $\frac{2\pi}{\lambda}$ – модуль волнового вектора (волновое число), $\frac{2\pi}{\lambda} = k$; λ – длина волны в материале среды, где распро-

страняется акустическая волна; P_0 – амплитуда давления, создаваемого элементарным излучателем на единичном расстоянии от элементарной площадки dS .

В этом выражении расстояние R от элементарного излучателя площадью $dS = r \Delta r \Delta \alpha$, расположенного в точке с координатами x, y , до точки A определяется следующим выражением:

$$R = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2}. \quad (2)$$

Для вычисления суммы (1) удобно применять цилиндрическую систему координат. Вычисление этой суммы проводится следующим образом. Вся поверхность пьезопластинки разбивается на N элементарных площадок площа-

дью $dS = r\Delta r\Delta\alpha$, где r – расстояние от начала координат до элементарной площадки, а Δr и $\Delta\alpha$ – ее линейный и угловой размеры соответственно.

Число элементарных площадок выбирается таким образом, чтобы расстояние от соседних площадок до рассматриваемой точки A было значительно меньше длины акустической волны в

материале среды, в которой она распространяется.

Расчеты проводились для непрерывного режима работы круглой пьезопластины диаметром 10 мм, нагруженной на воду и работающей на резонансной частоте 5 МГц.

К примеру, на рис. 2 приведено распределение давления P на оси пьезопластины.

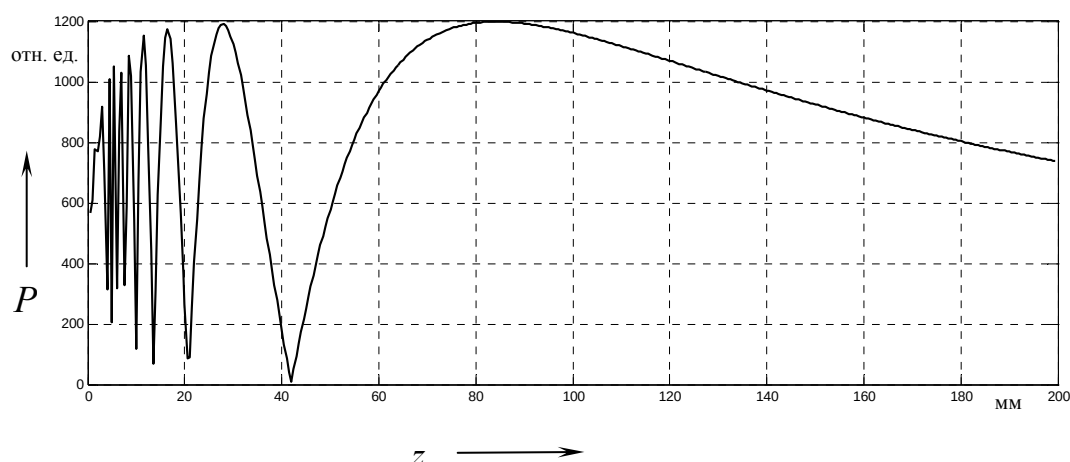


Рис. 2. Распределение давления акустической волны вдоль оси пьезопластины

Из рисунка видно, что для ближней зоны характерна осцилляция давления, а последний максимум наблюдается на расстоянии 83 мм от пьезопластины, что согласуется с литературными данными о размерах ближней зоны круглой пьезопластины [2].

Как в ближней, так и в дальней зонах акустическое поле носит круглосимметричный характер с осью симметрии, совпадающей с осью пьезопластины.

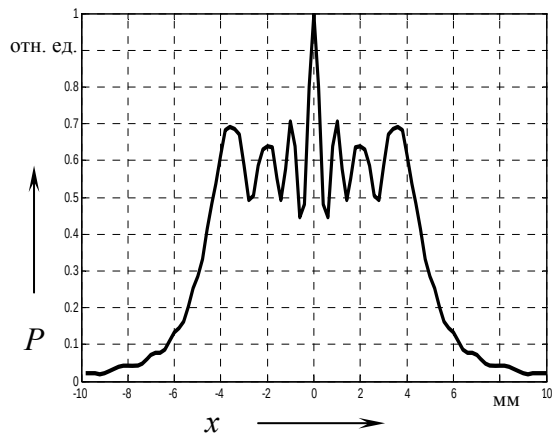
В ближней зоне наблюдается неоднородный характер распределения давления акустических волн в каждой плоскости, перпендикулярной оси пьезопластины. К примеру, на рис. 3, а приведено распределение акустического давления P в плоскости XOZ на рас-

стоянии 5 мм от пьезопластины, а на рис. 3, б – трехмерный вид акустического поля на этом же расстоянии.

Анализ акустического поля в ближней зоне на разных расстояниях показал, что вдоль оси пьезопластины не везде наблюдается максимум акустического давления и, как правило, прослеживается ряд максимумов, сравнимых по амплитуде, как это видно на рис. 3, а.

В дальней же зоне энергия акустической волны сосредоточена, в основном, в центральном максимуме, распределенном вокруг оси пьезопластины. На рис. 4 приведено распределение акустического поля в осевой плоскости пьезопластины в дальней зоне на расстояниях 100, 200 и 300 мм от пьезопластины.

а)



б)

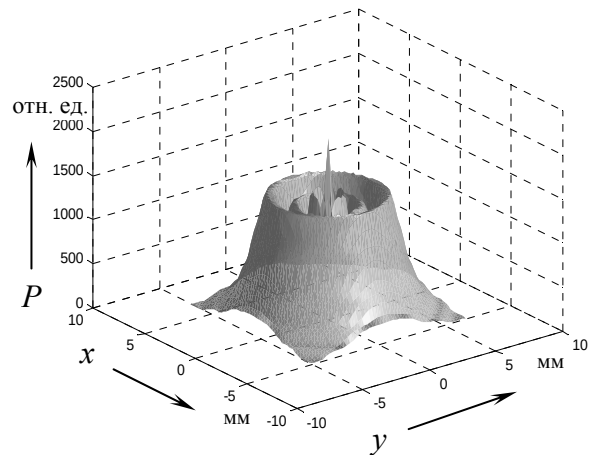


Рис. 3. Распределение давления акустических волн в ближней зоне в осяевой плоскости пьезопластины (а) и трехмерное изображение акустического поля (б) на расстоянии 5 мм от пьезопластины

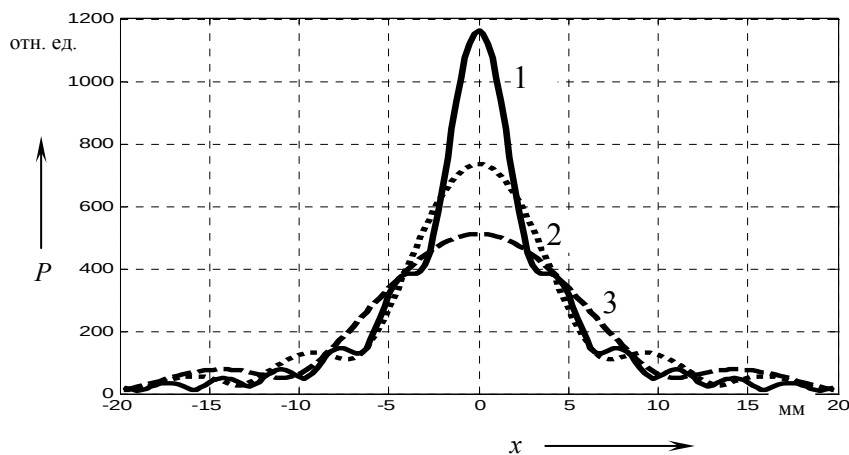


Рис. 4. Распределение акустического давления в дальней зоне на расстояниях 100 мм (1), 200 мм (2) и 300 мм (3) от оси пьезопластины

Из рисунка видно, что в дальней зоне при удалении от оси пьезопластины также наблюдаются дополнительные максимумы давления (боковые лепестки диаграммы направленности) акустических волн, но эти максимумы более чем в 5 раз меньше центрального. Анализ рассчитанного акустического поля в дальней зоне показал, что угловое раскрытие основного лепестка диаграммы

направленности по уровню 0,5 составляет $7,3^\circ$, что в 1,7 раза превышает дифракционную расходимость акустического излучения по нулевому уровню.

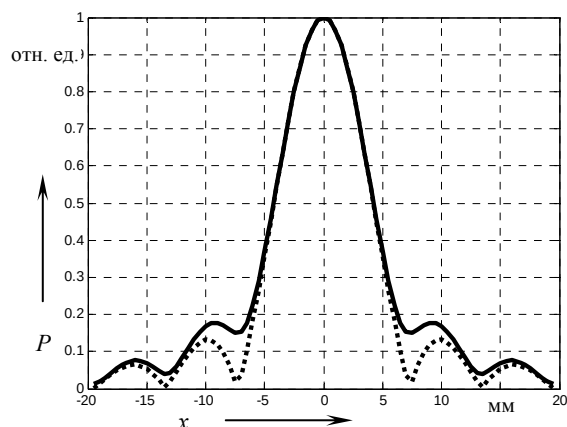
Из литературы известно, что акустическое поле круглых пьезопреобразователей в дальней зоне удовлетворительно описывается аналитической зависимостью [2]

$$|2J_1(X)/X|, \quad (3)$$

где $J_1(X)$ – функция Бесселя 1-го рода первого порядка; $X = ak \sin\theta$; a – радиус пьезопластины; k – волновое число в материале среды, в которой распространяется акустическая волна; θ – угол между акустической осью и направлением на точку, в которой рассматривается акустическое поле.

Было проведено сравнение акустического поля, рассчитанного по формулам (1) и (3). К примеру, на рис. 5, а сплошной линией приведено распределение акустического давления P в осевой плоскости XOZ на расстоянии 200 мм от пьезопластины, рассчитанное предлагаемым способом, а штриховой – вычисленное по аналитической зависимости (3).

а)



б)

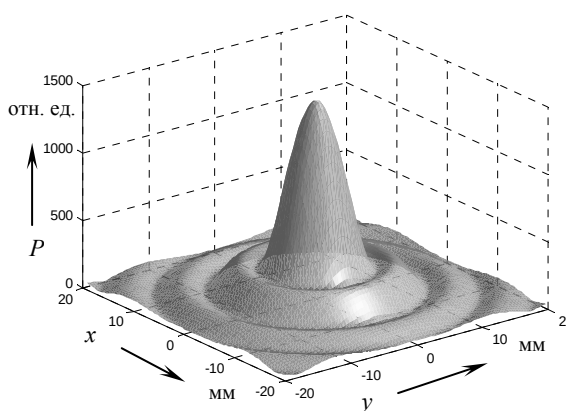


Рис. 5. Распределение давления акустических волн в дальней зоне в осевой плоскости пьезопластины (а) и трехмерное изображение акустического поля (б) на расстоянии 200 мм от пьезопластины

Из графиков видно, что в области центрального максимума, расположенного на акустической оси пьезопластины, рассчитанная зависимость практически совпадает с аналитической. Различие же заключается в том, что давление акустических волн, описываемое аналитической зависимостью, имеет более глубокие минимумы. Это различие наблюдается тем меньше, чем дальше происходит удаление от пьезопластины. Трехмерная картина акустического поля, приведенная на рис. 5, б, показывает, что поле носит симметричный характер относительно оси пьезопластины.

Кроме того, было осуществлено сравнение рассчитанного акустического поля с экспериментально измеренным. Экспериментальное измерение акусти-

ческого поля круглых пьезопреобразователей проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 6.

Установка работает следующим образом. Акустическое поле изучается при распространении ультразвуковой волны в цилиндрической кювете 1, заполненной водой 2. Кювета устанавливается на подставку 3 для того, чтобы ввести ультразвуковую волну в воду через дно кюветы через слой контактной жидкости от прямого пьезопреобразователя 4 на основе круглой пьезопластины диаметром 10 мм, который работает в импульсном режиме на резонансной частоте 5 МГц. Амплитуда импульса, излучаемого пьезопреобразователем, измеряется с помощью цифрового ультразвукового дефектоскопа УД4-76.

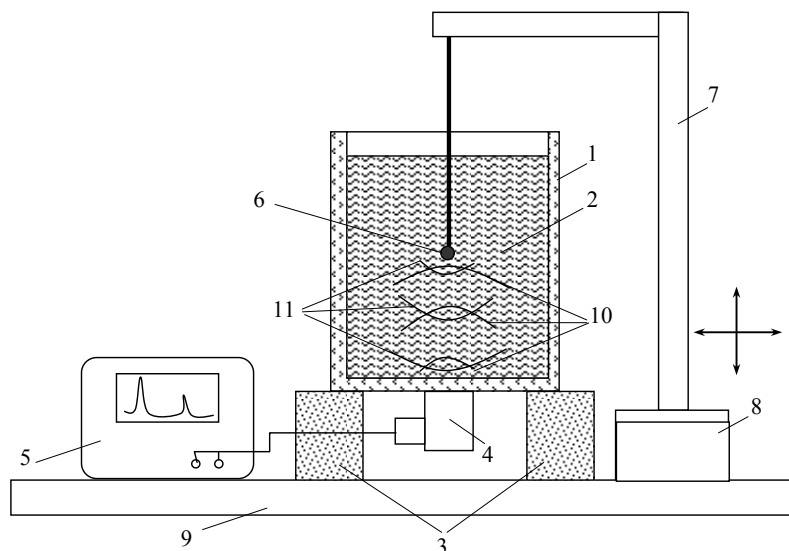


Рис. 6. Схема экспериментальной установки: 1 – цилиндрическая кювета; 2 – вода; 3 – подставки под кювету; 4 – пьезопреобразователь с круглой пьезопластиной; 5 – ультразвуковой дефектоскоп УД4-76; 6 – шаровый зонд; 7 – стойка для крепления зонда; 8 – двухкоординатный столик; 9 – стол; 10 – прямая акустическая волна; 11 – акустическая волна, отраженная от зонда

Акустическая волна 10, генерируемая пьезопреобразователем, распространяется от дна кюветы вверх по направлению к зонду 6, представляющему собой стальной шарик диаметром 1 мм, припаянный к отрезку медной проволоки диаметром 0,2 мм. Шаровой зонд 6 частично отражает акустическую волну в направлении пьезопреобразователя 4. Так как зонд представляет собой точечный отражатель, то отраженная от него волна 11 является сферической. Зонд закрепляется на стойке 7, которая фиксируется на двухкоординатном столике, позволяющем определять передвижение зонда в горизонтальном и вертикальном направлениях. В экспериментах снималась зависимость амплитуды акустической волны только в ближней зоне пьезопреобразователя, т. к. именно в ней наблюдается неоднородность акустического поля и характерные различия акустического поля на разных расстояниях от пьезопластины.

К примеру, на рис. 7 приведены рассчитанные и измеренные зависимости давления акустической волны P в осевой плоскости XOZ пьезопластины

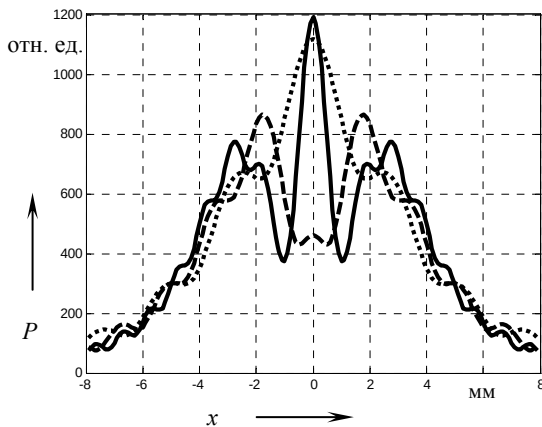
на расстояниях 28, 48 и 68 мм от пьезопластины.

Из рис. 7 видно, что основные закономерности качественно повторяются как для теоретических расчетов, так и для экспериментальных данных. Так, на расстоянии 28 мм от пьезопластины в центре наблюдаются наибольший максимум, по обе стороны которого прослеживаются меньшие максимумы. На расстоянии 48 мм на оси пьезопластины наблюдается провал, а на расстоянии 68 мм, которое близко к последнему максимуму акустического поля, – один максимум. Различие в деталях объясняется тем, что в экспериментах использовался импульсный режим работы пьезопреобразователя, при котором не проявляются многие детали интерференционной картины акустического поля, а также размеры применяемой кюветы не удовлетворяют условию полубесконечности пространства, что приводит к влиянию на определяемое акустическое поле паразитных отражений от стенок кюветы и поверхности воды. Кроме этого, размеры шарового зонда больше длины волны.

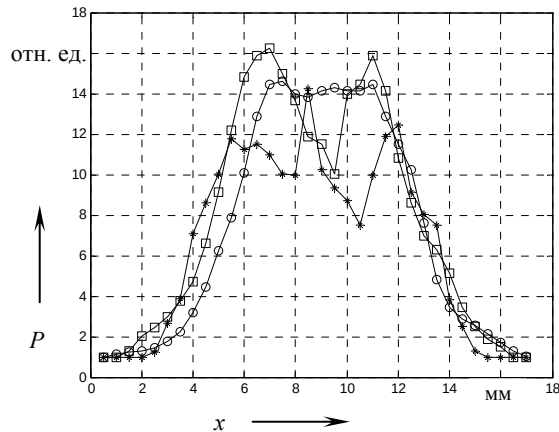
Таким образом, проведенные исследования акустического поля круглых пьезопластин показали основные зако-

номерности этого поля на различных расстояниях от пьезопластины.

а)



б)



— ; * — соответствуют расстоянию 28 мм от пьезопластины;
 - - - ; □ — соответствуют расстоянию 48 мм от пьезопластины;
 ; ○ — соответствуют расстоянию 68 мм от пьезопластины

Рис. 7. Теоретические (а) и экспериментальные (б) зависимости давления акустической волны в осевой плоскости пьезопластины в ближней зоне на разных расстояниях от пьезопластины

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурвич, А. К. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов / А. К. Гурвич, Л. И. Кузьмина. — Киев : Техніка, 1980. — 101 с.
2. Ермолов, И. Н. Неразрушающий контроль. Акустические методы контроля : практ. пособие в 5 кн. / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов ; под ред. В. В. Сухорукова. — М.: Высш. шк., 1991. — 283 с.
3. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. — М.: Машиностроение, 1986. — 280 с.
4. Борисов, В. И. Тонкая структура акустического поля излучения прямоугольных пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2014. — № 2. — С. 105–113.

Статья сдана в редакцию 31 марта 2015 года

Василий Иванович Борисов, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-22-52-12.

Сергей Сергеевич Сергеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-22-52-12.

Александр Сергеевич Никитин, студент, Белорусско-Российский университет.

Vasily Ivanovich Borisov, DSc (Physics & Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-22-52-12.

Sergey Sergeyevich Sergeev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-22-52-12.

Aleksandr Sergeyevich Nikitin, student, Belarusian-Russian University.

УДК 006.91

П. С. Серенков

ПРИМЕНЕНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

UDC 006.91

P. S. Serenkov

APPLICATION OF NONPARAMETRIC MODELS FOR UNCERTAINTY ESTIMATION OF RESULTS OF MEASUREMENTS

Аннотация

Проведен анализ путей решения проблемы обеспечения требуемой степени доверия к результатам измерений. В качестве доказательной основы предложены принципы системного и процессного подходов СТБ ISO 9001, адаптированные для сферы прикладной метрологии. Рассмотрены основные источники потерь достоверности результатов измерений. Установлено, что применение параметрических регрессионных моделей не всегда позволяет адекватно представить модель измерений и неизбежно вносит методическую ошибку при аппроксимации входных данных. Для формирования корректной модели оценки неопределенности результата измерения обоснована необходимость использования непараметрических моделей.

Ключевые слова:

результат измерений, неопределенность результата, степень доверия, системный подход, непараметрические модели измерений.

Abstract

The analysis of the solution ways to the problem of providing the required degree of confidence in the measurement results is shown. As the evidence base the principles of system and process approaches of ISO 9001, adapted to the field of applied metrology, are proposed. The main sources of measurement results reliability loss are discussed. It was found that the use of parametric regression models does not always adequately present the measurement model and inevitably introduces a methodological error in the approximation of the input data. Non-parametric models are justified as the correct models to estimate the uncertainty of the measurement results.

Key words:

measurement results, uncertainty of the result, degree of confidence, a systematic approach, nonparametric measurement models.

Постановка задачи

В условиях непрекращающейся глобализации мирового рынка растет необходимость взаимного признания результатов оценки соответствия продукции и услуг (в том числе результатов испытаний). Актуальность решения данной проблемы стимулирует научно-практическое развитие доказательной базы метрологии.

В контексте понятий СТБ ISO 9001 прикладная метрология – предметная область, основной вид деятельности в рамках которой (измерения) относится к так называемым «специальным» процессам. Действительно, продукцию такого «специального» процесса – результат измерения с неопределенностью – в принципе, невозможно однозначно перепроверить (верифицировать).

Показателем качества результата измерения с неопределенностью как информационного продукта является степень доверия к нему, причем ее предельное значение определяется риском неправильного принятия решения на основе полученного результата измерения.

Установлено, что обеспечить (оценить) требуемую степень доверия к результату измерения с неопределенностью можно косвенно – путем обеспечения (оценки) требуемого уровня доверия к процессу измерения, а точнее, ко всем элементам этого процесса. Причем в качестве доказательной основы здесь выступают принципы системного и процессного подходов СТБ ISO 9001, адаптация которых для сферы прикладной метрологии является актуальной.

Концепция неопределенности с позиций степени доверия к результату измерения

Отличительная особенность концепции неопределенности результата измерения в метрологии – решение задачи оценки точности измерения в явном виде. Действительно, цель измерения заключается в получении его результата – значения физической величины в виде диапазона значений с заданной вероятностью, типичная форма представления которой $A = A_0 \pm U_p, P$.

При этом A рассматривается как интегральная случайная величина, полученная в результате комплексирования влияющих на нее случайных величин $A_i = A_{i0} \pm U_{ip}, P_i$.

Очевидно, что доверительная вероятность P только в первом приближении может служить оценкой степени доверия к результату измерения $A_0 \pm U_p$. Это первое приближение определяется рядом ограничений, в частности, условиями идеальной организации процесса измерения, обеспечивающими уверенность в том, что все делалось правильно и в полном объеме [1, 2].

Широкое признание концепции неопределенности в прикладной метро-

логии инициировало развитие новых наукоемких подходов, методов и средств по достижению максимальной эффективности измерений (испытаний), например, по критерию «точность/трудоемкость» при заданной степени доверия. Причем объектами инновационных подходов становятся все аспекты измерения как комплексного процесса: основной процесс (собственно процесс измерения), процессы планирования, обеспечения, анализа результатов.

Алгоритм получения значения результата измерения $A_0 \pm U_p, P$ в общем случае тривиален и может быть сведен в общем виде к алгоритму классического системного анализа, включающему три основных этапа:

- 1) выявление и структуризация влияющих на измеряемый параметр качества продукции факторов, точнее, на его неопределенность;
- 2) нахождение функции связи;
- 3) анализ функции связи и принятие решения в отношении результата измерения на основании оценки степени доверия к нему.

Наиболее критичным с позиций степени доверия к результату измерения является первый этап. Действительно, вопрос, что влияет на конечный результат (точность измерения), не имеет прямого аналитического ответа и решается сегодня в основном экспертными методами.

Международной практикой применения концепции неопределенности в различных областях испытаний для обеспечения доказательности того, что в модели измерительной задачи охвачены все значимые источники неопределенности, разработан ряд методов [3]:

- «лестница неопределенностей», представляющая собой иерархическую схему структуры источников неопределенности измерения;
- причинно-следственные диаграммы, в которых источники неопределенностей результата измерения приписываются различным частям измери-

тельной системы, например, S.W.I.P.E. (Эталон. Деталь. Измерительный прибор. Человек. Процедура и Окружающая среда), P.I.S.M.O.E.A. (Деталь. Измерительный прибор. Эталон. Метод. Оператор. Окружающая среда. Допущения).

Второй и третий этапы алгоритма касаются методики оценки суммарной неопределенности результата измерения $A = A_0 \pm U_p, P$. Практикой применения концепции неопределенности в отношении подходов и методов сформулировано правило разумной достаточности: «Цель определяет средства ее достижения» [2], т. е. методы и средства планирования и реализации измерений должны отвечать требованиям пользователя. Данный факт предоставляет измерительным лабораториям широкие возможности выбора методов, повышающих эффективность измерений (испытаний).

Характерным в этом смысле являются результаты анализа применения в практической метрологии строгого математического подхода, на котором акцентировано внимание в [1, 2]. Подход реализуется как «метод восьми шагов», предполагает поэлементную оценку вкладов всех влияющих факторов с последующим их комплексированием по «закону распространения неопределенностей». Соответственно такой подход имеет высокую трудоемкость за счет поочередного исследования вклада каждого из источников неопределенностей, что снижает общую эффективность измерений. При этом достоверность подхода не гарантирована, т. к. строго не отслеживается взаимное влияние факторов, т. е. их корреляция. Как следует из ряда примеров, корреляция факторов проверяется, как правило, экспертным методом, т. е. «на глаз», что не вяжется со строгостью подхода [1, 2].

В аналитических отчетах Eurolab, Eurachem CITAS и др. в последние годы сделан акцент на использование «эмпирических подходов» при оценке неопределенности результата измерения как

альтернативы строгому математическому моделированию [1, 2]. Главный довод в пользу «эмпирических подходов» — значительное повышение эффективности процесса измерения. В основе «эмпирических подходов» лежат две достаточно тривиальные идеи [4]:

1) использование оценок неопределенностей отдельных влияющих факторов по типу B , которые обычно значительно уменьшают трудоемкость измерений, при этом обеспечивая достаточную надежность данных;

2) использование сгруппированных данных, чтобы непосредственно оценить «расширенную неопределенность результата», например, данных внутрилабораторного оценивания, межлабораторных сличений, проверок качества лабораторий и др.

Последнее предполагает, что сгруппированные данные как «черный ящик» представляются одним комплексным влияющим фактором (источником), дающим свой вклад в суммарную неопределенность результата измерения наряду с другими источниками.

Наиболее рациональным признан комбинированный подход к планированию и реализации процесса измерения, предполагающий участие в сводной модели измерений как элементарных, так и комплексных факторов (сгруппированных данных) [2, 4].

Сводная модель измерений как модель аппроксимации функции связи может быть представлена в общем виде как

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m, a_1, a_2, \dots, a_n), \quad (1)$$

где Y — оцениваемый результат измерения; $x_1, x_2, \dots, x_m$ — влияющие элементарные и комплексные факторы (сгруппированные данные); f — аналитическая функция связи; $a_1, a_2, \dots, a_n$ — параметры аналитической функции связи, подлежащие определению.

При выборе класса модели (1) следует руководствоваться принципами асимптотической несмещенности, со-

стоятельности, интерполяционной устойчивости алгоритма порядка k .

В реальных условиях реализации комплексного процесса измерения параметрические регрессионные модели (модели с фиксированным количеством параметров n) не всегда позволяют адекватно представить сводную модель измерений (1) или ее «вложенный» фрагмент для сгруппированных данных. Их применение неизбежно вносит методическую ошибку при аппроксимации входных данных. Например, если априори неизвестную фактическую нелинейную зависимость (1) аппроксимировать линейной регрессионной моделью, появляется методическая ошибка аппроксимации, причем значение ее может быть соизмеримо не только со случайными составляющими ошибки, но и с самим значением Y .

Для решения сложных измерительных задач анализа данных и приня-

тия решений в условиях существенной априорной неопределенности наиболее перспективными являются методы непараметрического оценивания. Использование такого рода моделей для решения данного класса задач позволяет свести к минимуму методическую ошибку аппроксимации.

Сопоставим использование метода параметрической и непараметрической аппроксимации для моделирования «сгруппированных» данных в процессе решения конкретной измерительной задачи, приведенной в [1].

Термометр калибруется в диапазоне 21,5...26,5 °С. Количество точек в пределах диапазона $n = 11$. В табл.1 представлены средние значения показаний термометра t_k и наблюдаемые поправки $(t_k - t_{R,k})$, где $t_{R,k}$ – соответствующее опорное значение температуры в точке k , $k = 1, \dots, n$.

Табл. 1. Данные, используемые для построения градуировочных кривых для параметрической и непараметрической моделей

Показание термометра t_k , °С	Наблюдаемая поправка $t_k - t_{R,k}$, °С	Разность между наблюдаемой и предсказанной поправками, °С	
		Используемая линейная модель [1]	Непараметрическая модель [5]
1	2	3	4
21,521	0,171	–0,0031	+0,0006
22,012	0,169	–0,0022	+0,0003
...	...	...	...
26,010	0,161	–0,0029	+0,0006
26,511	0,160	–0,0030	–0,00023

В качестве модели аппроксимации градуировочной характеристики термометра авторами [1] принята линейная параметрическая модель: линейная градуировочная кривая аппроксимирует наблюдаемые поправки и температуры методом наименьших квадратов (см. табл. 1, столбец 3).

Точность аппроксимации градуировочной характеристики термометра,

представляемая неопределенностью градуировки, является комплексным фактором (сгруппированными данными), вносящим свой вклад в сводную модель неопределенности измерений (1). Действительно, неопределенность аппроксимации функции связи включает следующие элементарные факторы:

– «качество» аппроксимации (приближенного восстановления и

сглаживания функции связи);

- неточность воспроизведения факторов и результата измерения;
- недостаточность точек n в диапазоне калибровки;
- «качество» заполнения факторного пространства регистрируемыми данными (равномерность распределения n точек в диапазоне калибровки).

Предлагается применять для решения подобных задач универсальный под-

ход, позволяющий отказаться от идеи априорного подбора параметров модели. В частности, для решения данной задачи (построения в общем случае нелинейной зависимости) рекомендуется использовать непараметрическую модель, основанную на методе сингулярных вейвлетов (см. табл. 1, столбец 4) [5]. В дискретном случае аппроксимация методом сингулярных вейвлетов имеет вид:

$$f(t) = \sum_{k=0}^K \left(\sum_{m=1}^M U^k(b_m) \cdot \psi\left(\frac{t-b_m}{a_k}\right) \right) / \sum_{m=1}^M \psi\left(\frac{t-b_m}{a_k}\right), \quad (2)$$

где k – номер приближения; K – максимальный порядок приближения; M – количество узлов аппроксимации (точек факторного пространства); $a_k = C/2^k$, $C = \text{const}$; b_m – узлы аппроксимации ($m = 1, \dots, M$); $U^k(b_m)$ – дискретные

значения сингулярного вейвлет-преобразования в узловых точках.

Значения $U^k(b_n)$, $n \in m = 1, \dots, M$, будем вычислять, используя следующий рекуррентный алгоритм:

$$U^0(b_n) = f(b_n);$$

$$U^{k+1}(b_n) = U^k(b_n) - \left(\sum_{m=1}^M U^k(b_m) \cdot \psi\left(\frac{b_n-b_m}{a_k}\right) \right) / \sum_{m=1}^M \psi\left(\frac{b_n-b_m}{a_k}\right). \quad (3)$$

Выражение (3) является дискретным аналогом сингулярного вейвлета, подробно исследованного в [5]. В частном случае, когда $k = 0$, ряд совпадает с оценкой Парзена–Розенблата [5]. В качестве дельтаобразной функции выбрана функция $\psi(x) = e^{-x^2}$.

При анализе неопределенности аппроксимации достаточно ограничиться в ряде (3) четырьмя членами, т. к. коэффициенты вейвлет-преобразования, как показывают расчеты, с увеличением k очень быстро убывают (табл. 2).

Численная оценка неопределенности результата аппроксимации может быть выполнена с использованием следующего выражения:

$$|R_\varepsilon^0| \leq r \cdot \varepsilon / L \cdot \sqrt{\sum_m \psi\left(\frac{\tau_m - t}{a_k}\right)}, \quad (4)$$

где $\varepsilon^2 = (M_1^2 + M_2)$; $M_1 = \max_i |U_i^1|$;

$$M_2 = \max_{i,j} \left| (U_i^0 - U_j^0)^2 \cdot \psi\left(\frac{\tau_i - \tau_j}{a_0}\right) \right|;$$

r – коэффициент охвата, являющийся аналогом одноименного коэффициента, используемого для определения расширенной неопределенности результата измерения [1, 2]; L – количество повторных измерений в каждой точке.

Табл. 2. Дискретные коэффициенты сингулярных вейвлетов в узлах аппроксимации b_m

m	$U^0(b_n)$	$U^1(b_n)$	$U^2(b_n)$	$U^3(b_n)$
1	-0,171	$-7,917e-3$	$-5,857e-3$	$-2,716e-3$
2	-0,169	$-6,069e-3$	$-4,491e-3$	$-2,142e-3$
...	...	...	...	...
11	-0,160	$1,664e-3$	$-1,323e-4$	$-8,578e-4$

Доверительной вероятности $P = 0,95$ отвечает значение $r = 1,96$. В соответствии с [3] для ориентировочных оценок можно предложить значение $r = 0,6475$ для вероятной ошибки метода $P = 0,5$.

Величина $|R_\varepsilon^0|$ – комплексная характеристика неопределенности аппроксимации, отражающая все возможные источники «потерь достоверности». В таком виде она как представитель «сгруппированных данных» может быть встроена в сводную модель измерений (1).

Прогнозируемое значение результата калибровки термометра в любой точке диапазона (без учета остальных факторов сводной модели (1)) можно представить в форме, принятой при оценивании неопределенности результатов измерений в метрологии [1, 2]:

$$y = y^{\text{аппрокс.}} \pm R_\varepsilon^0. \quad (5)$$

Пример оценки достоверности аппроксимации построения градуировочной кривой по данным [1] приведен на рис. 1 для случая $P = 0,95$.

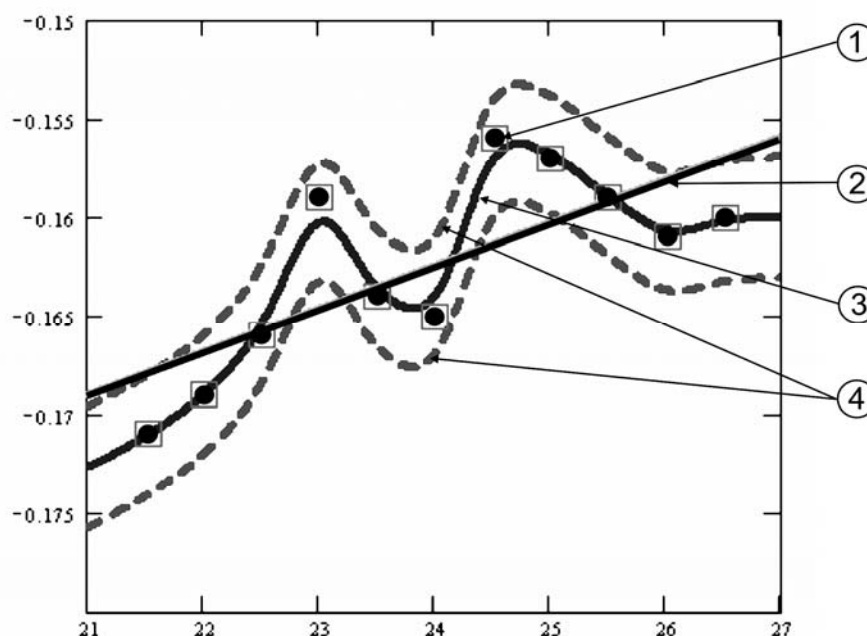


Рис. 1. Результаты и границы неопределенности аппроксимации градуировочной характеристики термометра различными методами: 1 – экспериментальные значения в точках калибровки; 2 – аппроксимация линейной регрессионной моделью [1]; 3 – аппроксимация методом сингулярных вейвлетов [5]; 4 – границы неопределенности аппроксимации

Выводы

Проблема обеспечения требуемой степени доверия к результатам измерений является актуальной. Доказательной основой измерений должны выступать принципы системного и процессного подходов СТБ ISO 9001, адаптированные для сферы прикладной метрологии. Главные источники потерь достоверности результатов измерений соответствуют этапам классического системного анализа применительно к процессу измерений: выявление и структуризация влияющих факторов, нахождение и анализ функции связи, принятие

решения в отношении результата измерения на базе оценки степени доверия к нему.

Для создания как сводных моделей измерения (функций связи), так и локальных (представляющих «сгруппированные» данные) для оценки неопределенностей результатов наиболее корректными являются непараметрические методы аппроксимации. Выбор в пользу классической линейной аппроксимации в [1, 2] не представляется очевидным по причине наличия ее методической ошибки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guide Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement 1st corr. Edition, ISO. – Geneva, 1995. – 101 p.
2. Measurement uncertainty revisited : Alternative approaches to uncertainty evaluation // EUROLAB Technical Report. – 2007. – № 1. – 62 p.
3. Measurement Systems Analysis Reference Manual // DaimlerChrysler Corporation, Ford Motor company, General Motors Corporation. – 2002. – 217 c.
4. **Серенков, П. С.** Концепция развития доказательной базы современной метрологии. Техническая составляющая процесса измерения / П. С. Серенков, Е. Н. Савкова, К. А. Павлов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 97–104.
5. **Романчак, В. М.** Аппроксимация сигнала методом сингулярных вейвлетов / В. М. Романчак, П. С. Серенков // Приборостроение–2008 : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2008. – С. 171–172.

Статья сдана в редакцию 26 мая 2015 года

Павел Степанович Серенков, д-р техн. наук, Белорусский национальный технический университет.
E-mail: Pavel_Serenkov@mail.ru.

Pavel Stepanovich Serenkov, DSc (Engineering), Belarusian National Technical University.
E-mail: Pavel_Serenkov@mail.ru.

УДК 681.7.068

И. В. Шилова

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ С ЦЕЛЮ ПОСТРОЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

UDC 681.7.068

I. V. Shilova

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF MICROSTRUCTURED FIBERS FOR CONSTRUCTION OF MECHANICAL SENSORS

Аннотация

Приведены результаты исследования потерь излучения в трех различных типах микроструктурных волоконных световодов при одностороннем боковом сжатии, при изменении радиуса изгиба, а также исследования зависимости угла поворота плоскости поляризации при одностороннем боковом сжатии. Произведен расчет потерь излучения в микроструктурных волоконных световодах при одностороннем боковом сжатии.

Ключевые слова:

микроструктурный волоконный световод, микроструктурированный волоконный световод, фотонно-кристаллический волоконный световод, волоконно-оптический датчик.

Abstract

The paper presents investigations of radiation losses in three types of microstructured optical fibers under one-sided lateral contraction, by changing a bending radius, and investigations of Faraday rotation angle dependence in case of one-sided lateral contraction. The calculation of radiation losses in microstructured optical fibers under one-sided lateral contraction was made.

Key words:

microstructural optical fiber, microstructured optical fiber, photonic crystal optical fiber, optical fiber sensor.

Введение

В промышленности Республики Беларусь существует ряд задач измерения давления, деформации, температуры и других физических величин информационно-измерительными системами во взрыво- и пожароопасных условиях, а также в условиях воздействия высокого уровня электромагнитных полей [1].

Высокий уровень электромагнитных полей создает помехи и наводки в традиционных датчиках с электрическим выходным сигналом. Это затруд-

няет их практическое применение. Наиболее оптимально и экономически целесообразно решать эти задачи путем конструирования волоконно-оптических датчиков, имеющих ряд преимуществ по сравнению с традиционными электрическими: являются взрыво- и искробезопасными; имеют небольшие габариты и вес, высокую механическую прочность, простую конструкцию, т. е. повышенную надежность; изготавливаются из диэлектрических материалов, следовательно, обеспечивают электробезопасность; химически инертны; устой-

чивы к вибрациям, механическим ударам, повышенным и пониженным температурам; потребляют небольшое количество энергии; позволяют производить дистанционные измерения [2–5].

Перспективное направление волоконной оптики – разработка и исследование волоконных световодов с новыми свойствами. Одним из типов таких световодов являются микроструктурные (или микроструктурированные, или фотонно-кристаллические) волоконные световоды (МСВС), которые имеют в сердцевине цилиндрические полости, параллельные оси волоконного световода [6–9]. Подобное строение световедущей сердцевины придает микроструктурным световодам, по сравнению с обычными, ряд новых свойств [6–8].

Микроструктурные волоконные световоды имеют стоимость, значительно превышающую стоимость обычных многомодовых. Изготовление микроструктурных волоконных световодов становится всё более массовым, что со

временем удешевит их производство. Такие световоды широко исследуются во всем мире, в основном, с научными целями [6–9]. В работе сделан акцент на прикладном применении микроструктурных волокон: проанализированы волоконно-оптические первичные преобразователи различных физических величин на основе МСВС.

Образцы для исследования

Были исследованы возможности построения первичных преобразователей на основе трёх типов микроструктурных волоконных световодов: трёхслойного, четырёхслойного и пятислойного (т. е. с тремя, четырьмя и пятью слоями воздушных дырок, расположенных по гексагональной структуре), поперечные сечения которых представлены на рис. 1. Диаметр кварцевой оболочки равен 125 мкм, а диаметр упрочняющей полимерной оболочки – 245 мкм.

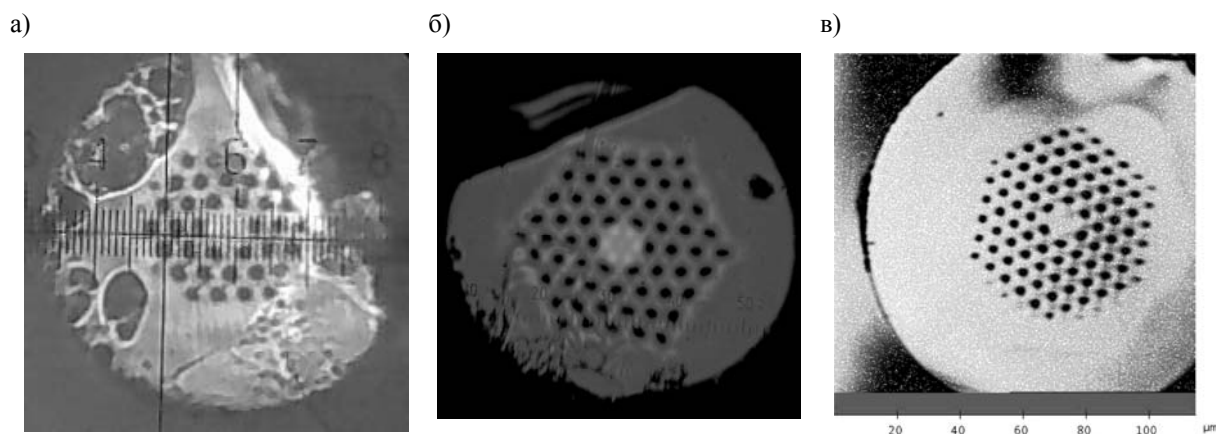


Рис. 1. Поперечное сечение микроструктурных волоконных световодов различных типов: а – МСВС 1-го типа (трёхслойный МСВС); б – МСВС 2-го типа (четырёхслойный МСВС); в – МСВС 3-го типа (пятислойный МСВС)

Исследование потерь излучения в микроструктурных волоконных световодах при одностороннем боковом сжатии

Был проведен расчет деформаций и напряжений (связанных с показателем

преломления) волоконных световодов при односторонней боковой нагрузке методом конечных элементов с помощью программы Ansys mechanical CFD. Размеры при построении модели были заданы в 10000 раз больше оригинала.

Прикладываемая сила составляла 1 Н. Поскольку исследуемые нагрузки находятся в зоне упругости, то полученные напряжения будут увеличиваться прямо пропорционально приложенной силе.

Для трёхслойного и пятислойного микроструктурных волоконных световодов были получены распределения напряжений по поперечному сечению, представленные на рис. 2 и 3.

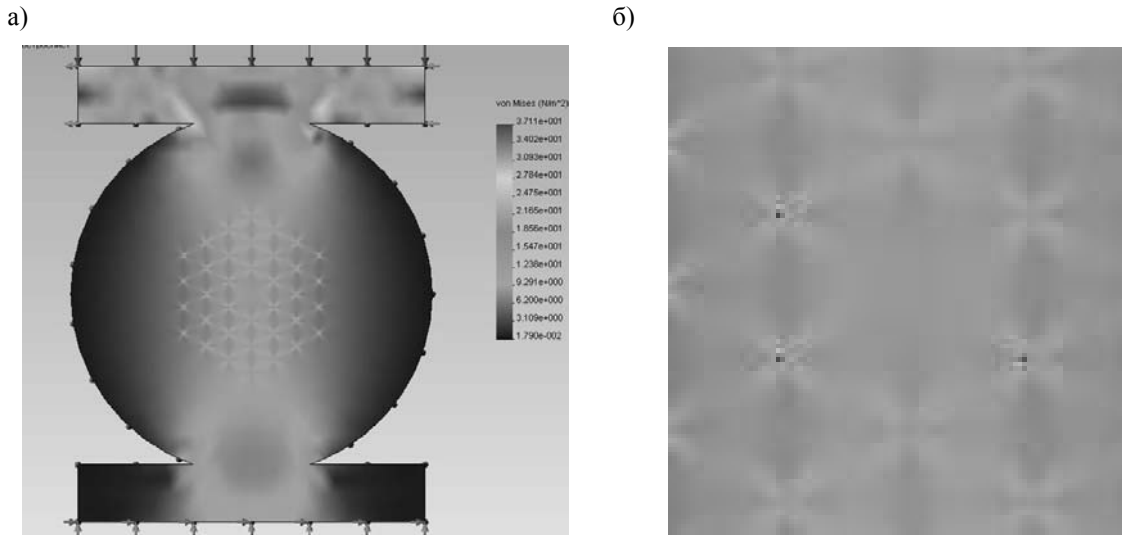


Рис. 2. Распределение напряжений по поперечному сечению для трёхслойного МСВС: а – общая картина; б – увеличенная центральная часть световода

Был проведен расчет микроструктурных волоконных световодов на одностороннее боковое сжатие, из которого видно, что при одностороннем боковом сжатии микроструктурного волоконного световода в области цилиндрических отверстий в сердцевине световода механические напряжения образуют дополнительную объемную фазовую решетку. Выдвинуто предположение, что на этой решетке будет рассеиваться излучение, распространяющееся по световоду, вследствие чего МСВС будет иметь более высокую чувствительность к одностороннему боковому сжатию, чем обычные волоконные световоды. Расчеты по распределению напряжений в сердцевине пятислойного МСВС были

проведены для различной ориентации шестигранника из воздушных дырок для сравнения получаемых картин распределения напряжений (см. рис. 3, б–г). Более светлые области в сердцевине световода на рис. 2 и 3 отображают большие механические напряжения. Сравнивая рис. 3, б–г, можно сказать, что объемная фазовая решетка из напряжений присутствует при всех ориентациях шестигранника из воздушных дырок, и рисунок этой решетки меняется незначительно.

Было рассчитано изменение показателя преломления для трёхслойного и пятислойного МСВС, используя следующие формулы [10]:

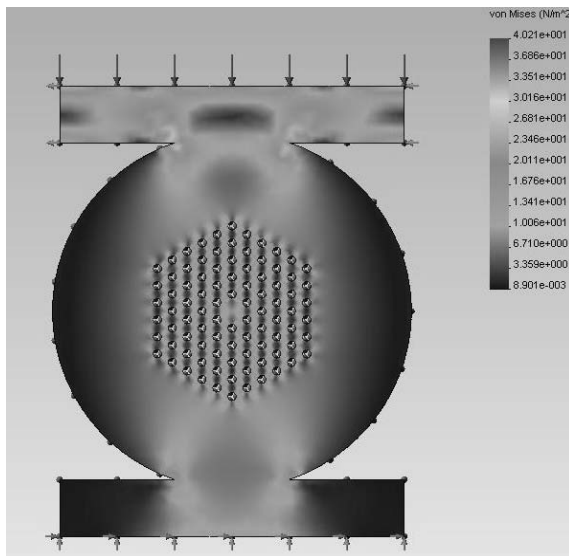
$$(\Delta n_{eff})_x = -\frac{n_0^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_x + [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_y + \sigma_z) \}; \quad (1)$$

$$(\Delta n_{eff})_y = -\frac{n_0^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_y + [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}](\sigma_x + \sigma_z) \}, \quad (2)$$

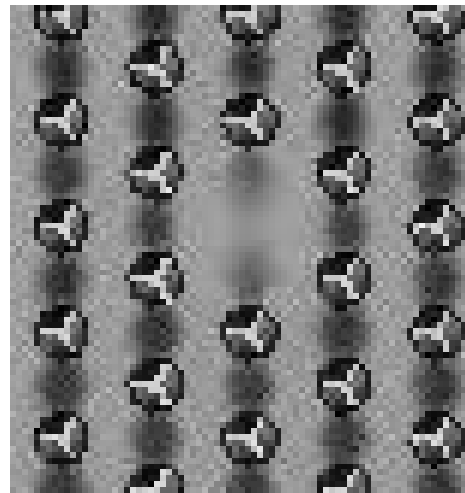
где E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; σ_x , σ_y , σ_z – составляющие на-

пряжения по осям OX , OY , OZ соответственно.

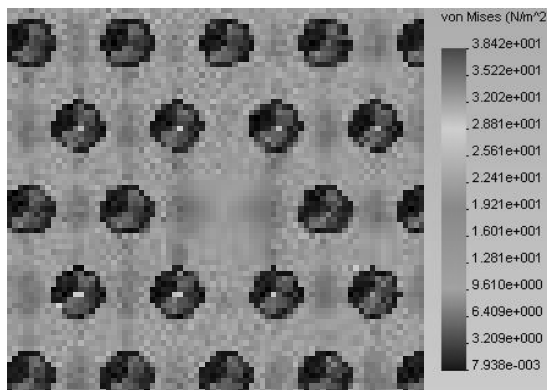
а)



б)



в)



г)

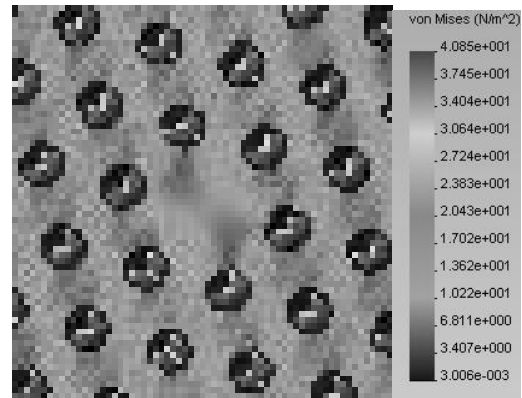


Рис. 3. Распределение напряжений по поперечному сечению для пятислойного MCBC при трех разных направлениях его нагружения: а – нагрузка приложена под углом 120° к грани шестиугольника из дырок; б – нагрузка приложена под углом 120° к грани шестиугольника из дырок (увеличенная центральная часть световода); в – нагрузка приложена под углом 90° к грани шестиугольника из дырок (увеличенная центральная часть световода); г – нагрузка приложена под углом 105° к грани шестиугольника из дырок (увеличенная центральная часть световода)

Для волоконных световодов $E = 74,52$ ГПа, $p_{11} = 0,121$; $p_{12} = 0,270$, $\nu = 0,17$.

Проведенные расчеты дали следующие значения:

– для трехслойного MCBC

$(\Delta n_{eff})_x = 4,53 \cdot 10^{-7}$ при нагрузке 1 Н; $(\Delta n_{eff})_x = 2,04 \cdot 10^{-5}$ при нагрузке 45 Н;

$(\Delta n_{eff})_y = 3,93 \cdot 10^{-7}$ при нагрузке 1 Н; $(\Delta n_{eff})_y = 1,77 \cdot 10^{-5}$ при нагрузке 45 Н;

– для пятислойного МСВС
 $(\Delta n_{eff})_x = 1,18 \cdot 10^{-6}$ при нагрузке 1 Н; $(\Delta n_{eff})_x = 1,18 \cdot 10^{-5}$ при нагрузке 10 Н;

$(\Delta n_{eff})_y = 1,03 \cdot 10^{-6}$ при нагрузке 1 Н; $(\Delta n_{eff})_y = 1,03 \cdot 10^{-5}$ при нагрузке 10 Н.

Таким образом, в пятислойном МСВС изменение показателя преломления при одинаковой нагрузке в 2,6 раза выше, чем в трёхслойном. Выдвинуто

предположение, что в связи с вышеизложенными расчетами потери излучения при сжатии пятислойного МСВС будут больше.

Были проведены экспериментальные исследования зависимости выходного сигнала от величины нагрузки для микроструктурных и стандартного многомодового световодов. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

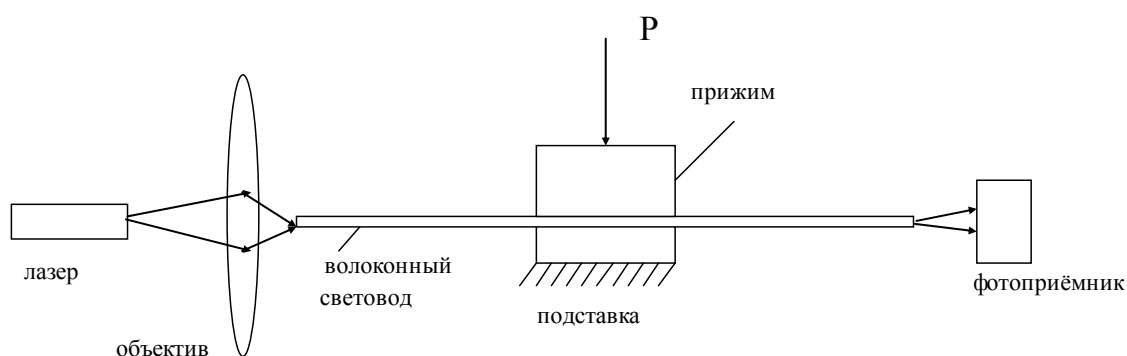


Рис. 4. Схема эксперимента для исследования потерь излучения от величины нагрузки на световод

Измерения проводились следующим образом. Излучение полупроводникового лазера с длиной волны 650 нм посредством восьмикратного микрообъектива вводилось в исследуемые световоды и регистрировалось на их выходе оптическим ваттметром ОМЗ-65. Усилие наводилось с помощью предварительно откалиброванной пружины. Длина прижима равна 85 мм.

Для сравнения использовали обычный стандартный многомодовый волоконный световод (ОВС), который имел следующие параметры: диаметр кварцевой сердцевины равен 50 мкм, диаметр кварцевой оболочки – 125 мкм, а диаметр упрочняющей полимерной оболочки – 245 мкм.

Результаты экспериментов представлены на рис. 5.

Измерения показали, что пятислойный микроструктурный волоконный световод имеет большую чувстви-

тельность к одностороннему боковому сжатию, чем трёхслойный, а тот, в свою очередь, более чувствителен к одностороннему боковому сжатию, чем многомодовый волоконный.

Сплошными линиями аппроксимированы экспериментальные результаты следующими функциями:

– для многомодового волоконного световода

$$O_p = -0,0015F + 1,0068; \quad (3)$$

– для трёхслойного МСВС

$$O_p = -0,0072F + 0,9881. \quad (4)$$

Для пятислойного МСВС сплошной линией показан средний результат по восьми измерениям.

Зависимость выходного сигнала от величины нагрузки для трёхслойного МСВС имеет линейный характер, а для пятислойного – близкий к линейному на некоторых участках.

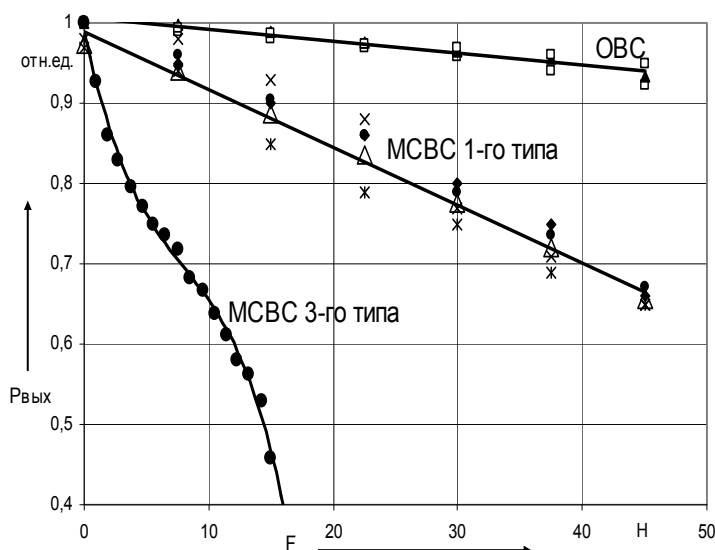


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала от величины нагрузки для МСВС 1-го и 3-го типов и для обычного многомодового волоконного световода

Эксперименты показали, что чувствительность многомодового волоконного световода к одностороннему боковому сжатию составляет 0,11 %/Н, чувствительность МСВС 1-го типа — 0,78 %/Н, чувствительность МСВС 3-го типа — 3,67 %/Н, т. е. чувствительность пятислойного МСВС к одностороннему боковому сжатию в 4,7 раза выше, чем у трёхслойного, и в 33 раза выше, чем у многомодового [11, 12].

Таким образом, наблюдаемый эффект можно использовать для построения амплитудных волоконно-оптических датчиков силы на основе микроструктурных оптических волокон с простой конструкцией.

Исследование потерь излучения в микроструктурных волоконных световодах при изменении радиуса изгиба

Были исследованы зависимости образцов микроструктурных световодов всех трех типов от радиуса изгиба. Для определения влияния длины волны

распространяющегося по МСВС излучения использовались три лазерных источника с длинами волн 633, 532 и 405 нм. В качестве приемника излучения применялся ваттметр оптический поглощаемой мощности ОМЗ-65. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 6.

В качестве эталонов кривизны применялся набор цилиндров.

В результате были получены зависимости, графики которых представлены на рис. 7, а–в. Каждый график — это усредненный результат по восьми измерениям. Для сравнения также была исследована зависимость выходного сигнала от радиуса изгиба для стандартного многомодового волоконного световода, имеющего следующие параметры: диаметр сердцевины — 50 мкм, диаметр кварцевой оболочки — 125 мкм, диаметр упрочняющей полимерной оболочки — 250 мкм. Она представлена на рис. 7, г. Каждый график — это усредненный результат по шести измерениям.

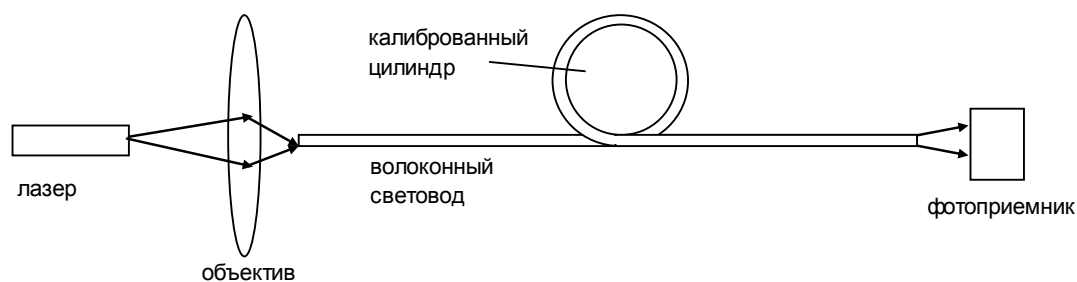
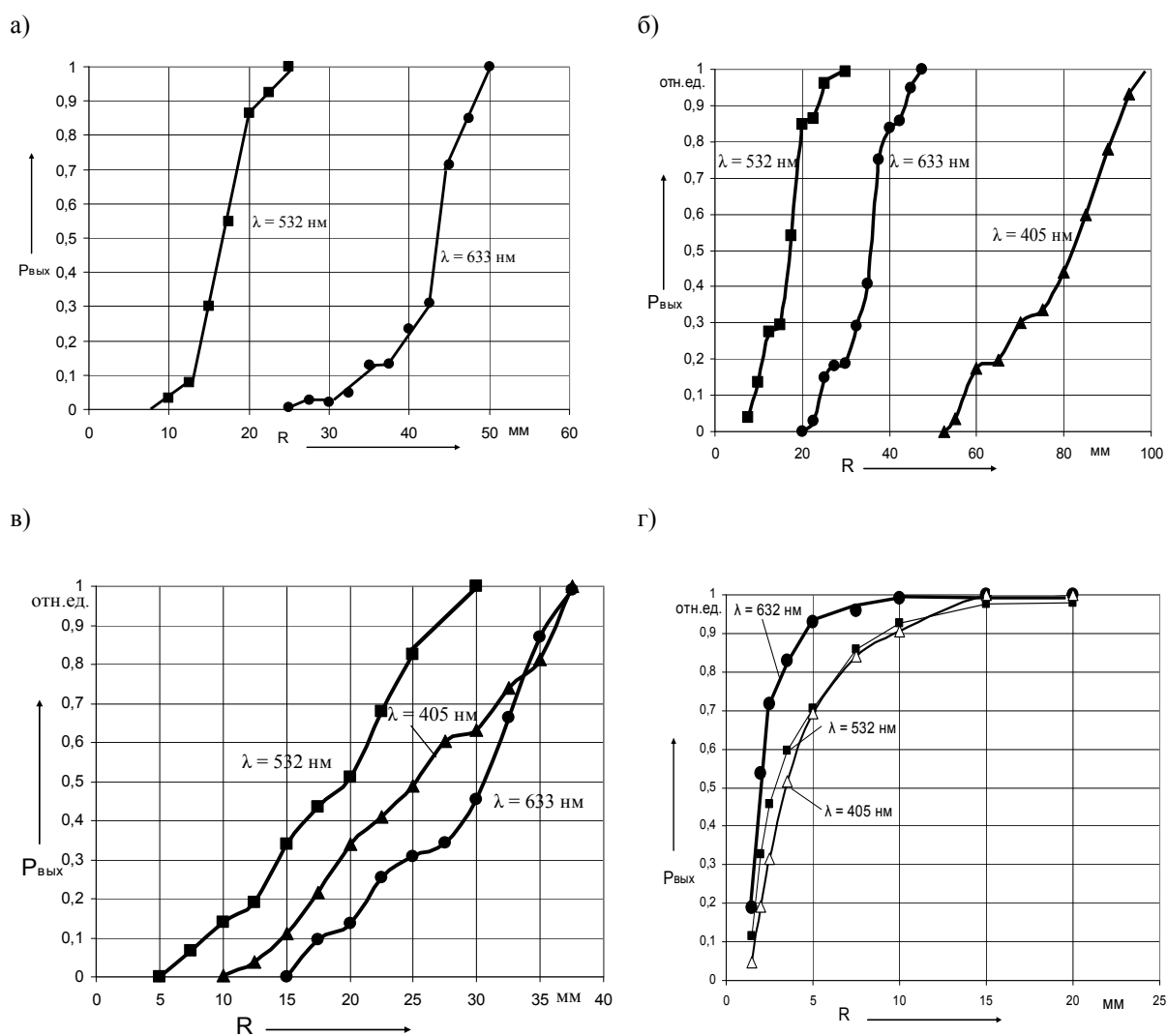


Рис. 6. Схема эксперимента для исследования зависимости выходного сигнала от радиуса изгиба световода



Из рис. 7, а–в можно сделать вывод, что в большинстве графиков зависимости выходного сигнала от изменения радиуса изгиба для различных микроструктурных волоконных световодов имеются «ступеньки», которые свидетельствуют о том, что по этим волокнам распространяется более одной моды. Это затрудняет применение МСВС в чувствительных элементах волоконно-оптических датчиков. Однако на некоторых участках зависимостей есть линейные участки с большой крутизной, которые можно использовать для построения датчиков механических величин: перемещения, силы, давления и т. п. Причем эти участки находятся в диапазоне достаточно больших радиусов изгиба, при которых на волоконный световод действуют нагрузки, не приводящие к его разрушению. Следует отметить, что для пятислойного МСВС эти «ступеньки» в зависимости выходного сигнала незначительны при применении в качестве источников излучения лазеров с различными длинами волн. Но чувствительность меньше, по сравнению с остальными образцами, и составляет 4 %/мм. Для четырехслойного МСВС у всех экспериментальных кривых при использовании лазеров с различными длинами волн наблюдаются «ступеньки», но чувствительность на отдельных участках графика $P_{\text{вых}}(R)$ больше, по сравнению с МСВС других

типов, и составляет 11 %/мм [13].

Из проведенных исследований также можно сделать выводы, что микроструктурные волоконные световоды намного более чувствительны к изменению радиуса изгиба: при радиусе изгиба 5 мм стандартного волоконного световода сигнал падает только на 50 %, в то время как для микроструктурных световодов выходной сигнал при таком радиусе уменьшается до нуля при использовании лазеров с длинами волн видимого диапазона.

Исследование угла поворота плоскости поляризации излучения, прошедшего через микроструктурный волоконный световод, при его одностороннем боковом сжатии

Схема эксперимента для исследования зависимости угла поворота плоскости поляризации излучения от силы, приложенной к микроструктурному волоконному световоду, приведена на рис. 8.

Для МСВС трех типов получили зависимости, представленные на рис. 9.

Проведенные эксперименты показали, что по мере увеличения приложенной силы в общем случае на выходе волоконного световода наблюдается преобразование линейной поляризации лазерного излучения в эллиптическую с поворотом осей эллипса [14].

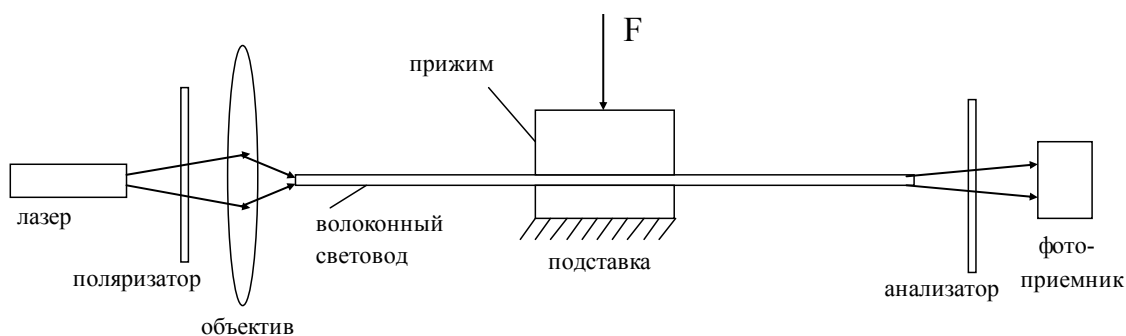


Рис. 8. Схема эксперимента для исследования зависимости угла поворота плоскости поляризации от нагрузки для МСВС

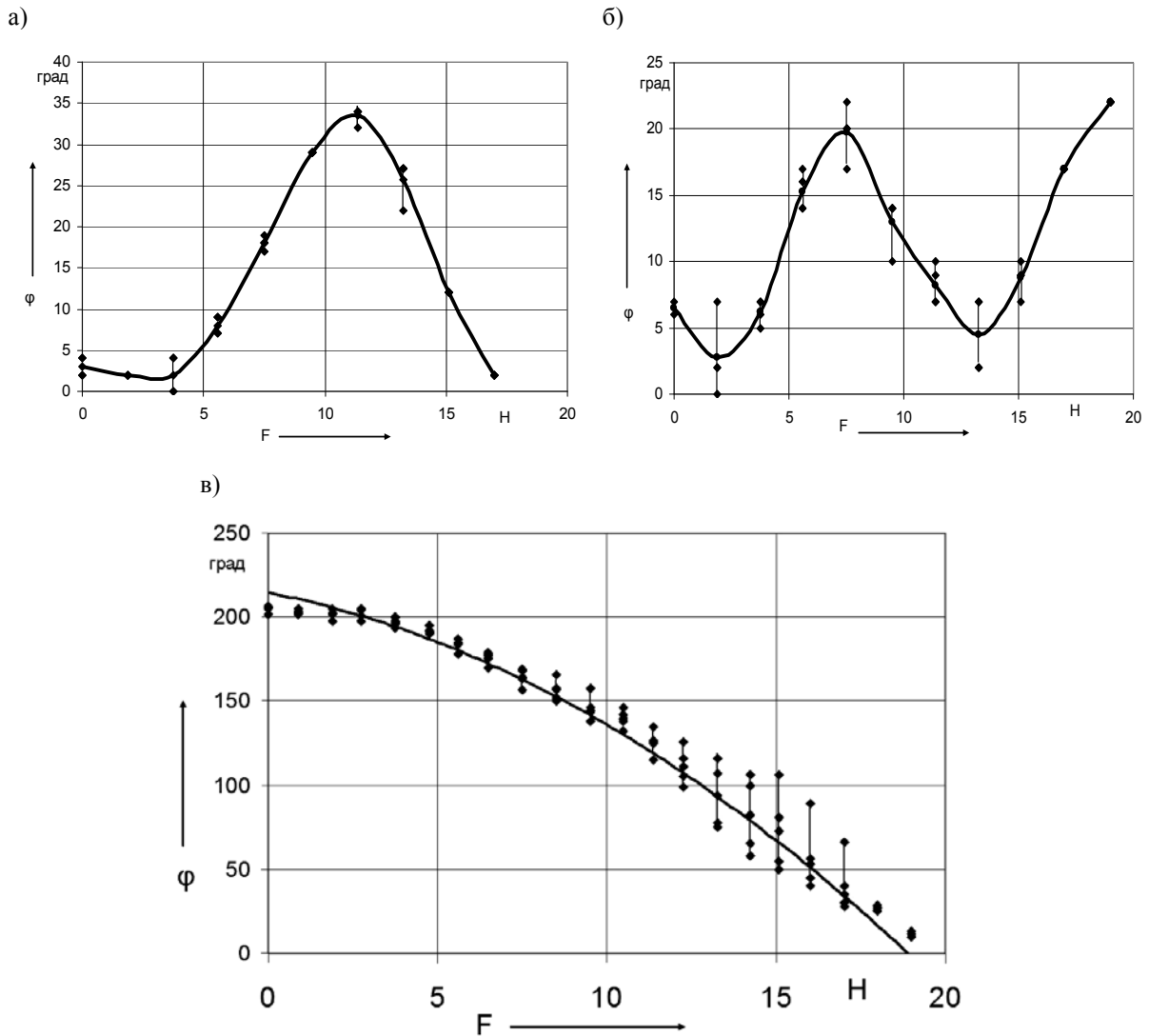


Рис. 9. Зависимость угла поворота плоскости поляризации МСВС от приложенной силы: а – для трёхслойного МСВС; б – для четырёхслойного МСВС; в – для пятислойного МСВС

Зависимость угла поворота плоскости поляризации от приложенной силы в диапазоне от 0 до 20 Н для микроструктурных волоконных световодов всех типов имеет синусоидальный вид.

Поскольку зависимость неоднозначная, то использовать трёхслойный и четырёхслойный МСВС для построения датчиков силы возможно только для небольших диапазонов измеряемой величины.

Зависимость угла поворота плоскости поляризации пятислойного МСВС от приложенной силы от 5 до 20 Н носит квазилинейный характер. Из полу-

ченных экспериментальных зависимостей можно сделать вывод, что для построения датчиков силы предпочтительно использовать пятислойный МСВС.

Заключение

Исследованы потери в специальных микроструктурных волоконно-оптических световодах с ограниченным числом воздушных полостей в оболочке и обычном многомодовом волоконном световоде при одностороннем боковом сжатии. Получена конечно-элементная модель, расчеты по которой показыва-

ют, что при сжатии механические напряжения на перемычках между цилиндрическими отверстиями образуют дополнительную объемную фазовую решетку. Выдвинуто предположение, что эта решетка оказывает влияние на фазовые свойства формирования электромагнитного поля моды световедущей сердцевины. Анализ подтверждает, что в области сердцевины показатель преломления становится неоднородным при одностороннем боковом сжатии. Это приводит к дополнительным потерям излучения в микроструктурном волоконном световоде, возрастающим с увеличением усилия сжатия.

Исследованы экспериментально микроструктурные волоконные световоды и стандартный световод как чувствительные элементы амплитудных волоконно-оптических датчиков силы. Экспериментальные исследования показали, что чувствительность пятислойных МСВС к одностороннему боковому сжатию в 4,7 раза выше, чем у трехслойных МСВС, и в 33 раза выше, чем у многомодового световода.

Зависимость выходного сигнала от радиуса изгиба для различных типов МСВС имеет «ступеньки». Есть предположение, что они появляются вслед-

ствие перестройки мод в МСВС, который является одномодовым при большой длине световода порядка 1 км. На небольших длинах такой световод может быть маломодовым. МСВС с тремя и четырьмя слоями воздушных дырок являются более чувствительными к изменению радиуса изгиба, чем пятислойные. Но пятислойные МСВС имеют менее выраженные «ступеньки» в зависимости $P_{вых}(R)$, которая приближена к линейной. Поэтому их удобнее использовать для построения датчиков перемещения, давления, силы и т. д. МСВС всех типов являются более чувствительными к изменению радиуса изгиба, чем многомодовые волоконные световоды.

Проведенные эксперименты показали, что зависимость угла поворота плоскости поляризации микроструктурного волоконного световода от приложенной силы нагрузки имеет вид синусоиды. Для пятислойных МСВС эта зависимость в интервале приложенных сил от 5 до 20 Н имеет характер, близкий к линейному. Поэтому такой тип МСВС лучше всего использовать для построения датчиков силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фрайден, Дж.** Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
2. **Shizhuo, Yin.** Fiber Optic Sensors. Second edition / Yin Shizhuo, Paul B. Ruffin, T. S. Yu Francis. – London ; New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 477 p.
3. **Бусурин, В. И.** Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
4. Волоконно-оптические датчики : пер. с яп. / Т. Окоси [и др.] ; под ред. Т. Окоси. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
5. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. – М. : Техносфера, 2008. – 520 с.
6. Photonic Crystals. Molding the Flow of light. Second edition / J. D. Joannopoulos [et al.]. – Princeton : Princeton University Press, 2008. – 305 p.
7. **Желтиков, А. М.** Микроструктурированные световоды в оптических технологиях / А. М. Желтиков. – М. : Физматлит, 2009. – 192 с.
8. **Борисов, В. И.** Некоторые направления развития оптики и технических применений волоконных световодов / В. И. Борисов, И. В. Шилова // Оптика неоднородных структур : материалы Респ. науч.-практ. конф. – Могилев : МГУ им. А. А. Кулешова, 2004. – С. 3–5.

9. **Minkovich, U.** Special photonic crystal fibers. Modeling, fabrication and application / U. Minkovich // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2011. – 74 p.
10. Experimental analysis of birefringence effect on fiber Bragg induced by lateral compression / Zhao Jingxi [et al.] // Optics Communications. – 2004. – № 229. – P. 203–207.
11. **Shilova, I. V.** Microstructured optical fiber losses in case of one-sided lateral contraction / I. V. Shilova // IEEE Laser Physics and Laser Technologies (RCSLPLT) and 2010 Academic Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology (ASOT), 2010 10th Chinese-Russian Symposium on Laser Physics and Laser Technologies. – 2010. – P. 277–279.
12. **Шилова, И. В.** Наведенные потери в микроструктурных волоконных световодах при одностороннем боковом сжатии / И. В. Шилова // Оптика неоднородных структур : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 16–17 февр. 2011 г. – Могилев, 2011. – С. 295–298.
13. **Шилова, И. В.** Влияние изгиба на потери излучения в микроструктурных волоконных световодах / И. В. Шилова, А. А. Аксёнова, Е. М. Полянская // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 30–31 окт. 2012 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 176.
14. **Борисов, В. И.** Влияние механических давлений на распространение света в волоконных световодах / В. И. Борисов, В. П. Минкович, И. В. Шилова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев 22–23 апр. 2004 г. : в 2 ч. – Могилев, 2004. – Ч. 2. – С. 248.

Статья сдана в редакцию 13 апреля 2015 года

Ирина Владимировна Шилова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: irina.schilova@tut.by.

Irina Vladimirovna Shilova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: irina.schilova@tut.by.

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 338

О. В. Голушкова, С. Л. Комарова, Д. Д. Янович

СЭНДВИЧ-ПАНЕЛИ КАК АЛЬТЕРНАТИВА КЛАССИЧЕСКИМ СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ И ОЦЕНКА ИХ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ

UDC 338

O. V. Golushkova, S. L. Komarova, D. D. Yanovich

SANDWICH PANELS AS AN ALTERNATIVE TO TRADITIONAL CONSTRUCTION MATERIALS AND THEIR COMPETITIVENESS ESTIMATION

Аннотация

Заинтересованность предприятий в результатах своей деятельности усиливает необходимость повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции. Предложена методика оценки основных строительных материалов методом многокритериальной оптимизации с помощью функции принадлежности, а также выделены группы показателей, по которым можно оценить и охарактеризовать строительные материалы различного состава.

Ключевые слова:

конкурентоспособность, сэндвич-панели, пеноблок, кирпич, цена, многокритериальная оценка.

Abstract

The interest of companies in their performance increases the need to improve the competitiveness of products, they manufacture. The technique of estimating basic construction materials by the method of multi-criteria optimization using the membership function is offered; and the groups of indices are presented to estimate and to characterize construction materials of different composition.

Key words:

competitiveness, sandwich panels, foam concrete block, brick, price, multi-criteria evaluation.

В современных условиях потребителю достаточно сложно сделать выбор материала, из которого будет выполнена конструкция. Чаще всего застройщик обращается к классическим материалам, таким как кирпич, силикатные блоки, пеноблок. Воспринимая эти материалы как самые прочные, надежные, долговечные и доступные, он забывает при этом, что создание конструкций из дан-

ных материалов требует серьезных финансовых вложений на начальном этапе (проектные, расчетные, а также подготовительные строительные работы). При возведении строений из классических материалов возникают дополнительные траты на фундамент, связующие материалы, на теплоизоляционные и кровельные работы.

Классические материалы и здания

требуют достаточно широкого спектра квалифицированных специалистов (каменщики, кровельщики, монтажники, крановщики, плотники и т. д.).

В качестве современного материала стоит обратить внимание на сэндвич-панели, которые появились на рынке совсем недавно, но уже успели себя зарекомендовать как надежный строительный материал.

Сфера использования сэндвич-панелей достаточно обширна: быстровозводимые промышленные здания, торговые комплексы, складские помещения, торговые павильоны, а также жилые дома, детские сады, больницы, что обусловлено привлекательным внешним видом материала, экологичностью и небольшой стоимостью. Также сэндвич-панели применяются для возведения предприятий пищевой промышленности при условии эксплуатации в нормальном и влажном режимах, неагрессивных или слабоагрессивных средах от минус 60 до плюс 75 °С. В современном мире огромным спросом пользуются холодильные камеры. Сэндвич-панели как строительный материал для холодильных камер наиболее оптимальны: они обеспечат наилучшую теплоизоляцию и позволят выполнить монтаж камер качественно и быстро.

Монтаж зданий, облицованных сэндвич-панелями, осуществляется в короткие сроки. При небольшом весе, по сравнению с традиционными строительными материалами, стены из сэндвич-панелей имеют меньший размер и большую теплоизоляцию.

Сэндвич-панели рекомендуется использовать в местах, где невозможно или нежелательно применять традиционные материалы: при меньшем весе и толщине сэндвич-панели обеспечат необходимые эксплуатационные характеристики. При этом современная конструкция материала гарантирует звукоизоляционные свойства, что делает его незаменимым для строительства развлекательных и спортивных зданий. Время

монтажа панелей значительно сокращается благодаря использованию саморезов. Многообразие цветовых решений и четыре вида облицовки (гладкая, волнистая, трапециевидная, накатка) позволяют реализовать любое архитектурное желание.

Сэндвич-панели – это крупноразмерные конструкции в виде трёхслойных элементов, в которых находится теплоизоляционный слой, выполненный из современных, высокоэффективных теплоизоляционных материалов: минеральной ваты на основе базальтового волокна или пенополистирола самозатухающих марок.

Сэндвич-панели представляют собой высокотехнологичный материал с превосходными эксплуатационными и декоративными характеристиками, который может использоваться как для реконструкции зданий, так и для их строительства. Сэндвич-панели поэлементной сборки состоят из таких элементов, как сэндвич-профиль из стали 0,7...1 мм, утеплитель (минеральная вата, стекловолокно), гидро- и ветрозащитные пленки и наружная облицовка; трехслойные клееные – из сердечника на основе минеральной ваты или пенополиизоцианурата и сопряженных с ним стальных облицовок. Для защиты облицовок от коррозии используются современные полимерные покрытия, представленные в широком ассортименте цветов. В зависимости от назначения сэндвич-панели могут применяться для устройства стен и кровель.

Сэндвич-панели обладают отличными теплоизоляционными характеристиками, значительно более высокими, чем у традиционных строительных материалов. Применение сэндвич-панелей в качестве ограждающих конструкций позволяет получить хорошую теплоизоляцию. При этом, по сравнению с использованием альтернативных материалов, толщина стен будет в разы меньше.

При возведении объектов, в которых существует необходимость пони-

зять уровень шума (развлекательных, спортивных учреждений), в сэндвич-панелях могут применяться специальные перфорированные облицовки, позволяющие добиться отличной звукоизоляции.

Отсутствие появления конденсата дает возможность вести строительство с использованием сэндвич-панелей в любое время года.

Качество материалов позволит сохранить привлекательный внешний вид

на протяжении долгих лет благодаря специальным полимерным покрытиям, применяемым для защиты облицовок от внешних и внутренних воздействий.

Продукция отвечает строгим требованиям безопасности и экологии. Дома из сэндвич-панелей по заключениям ведущих европейских экспертов считаются экологически чистым жильем.

Для сравнения по теплопроводности наполнителей сэндвич-панелей составлена табл. 1.

Табл. 1. Коэффициент теплопроводности применяемых теплоизоляционных материалов

Название наполнителя	Значение коэффициента теплопроводности
Пенополиуретан	0,019...0,025
Пенобетон	0,056...0,098
Минвата	0,04...0,045
Пенополистирол	0,03...0,037

На рынке строительных материалов предложен достаточно широкий спектр сэндвич-панелей, обладающих различными характеристиками, которые

напрямую связаны с видом утеплителя. И каждый вид утеплителя дает разные характеристики и свойства, которые представлены в табл. 2.

Табл. 2. Сравнение теплоизоляционных материалов

Утеплитель	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Водопоглощение, % от объема	Прочность при сжатии, МПа	Срок эксплуатации
Пенополиуретан	40...160	0,019...0,025	1,2...2,1	0,15...1	30
Минеральная вата	55...150	0,052...0,058	0	0	5
Пробковая плита	220...240	0,050...0,060	0	0	3
Пенобетон	250...400	0,145...0,160	0	0	10

Самое трудное – убедить застройщика выбрать новый полимерный материал, но и эта задача может быть решаемой, т. к. любой предприниматель хочет сэкономить деньги и быстро получить готовый объект при минимальных вложениях. Приведем в табл. 3 характеристики классических строительных материалов, таких как кирпич силикатный и строительный блок из керамзитобетона, которые на сегодняшний день являются лидерами продаж на

рынке основных строительных материалов.

Изучая табл. 2 и 3, даже специалисту трудно определиться с выбором основного строительного материала. Необходим подход, который позволит сделать выбор в пользу какого-то из материалов. Одним из подходов при определении наиболее эффективного строительного материала может служить оценка его конкурентоспособности.

Табл. 3. Сравнительная характеристика классических строительных материалов

Показатель	Единица измерения	Кирпич строительный силикатный	Строительный блок из керамзитобетона
Плотность	кг/м ³	1700...1950	900...1200
Теплопроводность	Вт/(м ² ·К)	0,85...1,15	0,5...0,7
Срок эксплуатации	лет	120	120
Водопоглощение	% от объема	16	18
Предел прочности при сжатии	МПа	5...30	3,5...7,5

Конкурентоспособность товара раскрывается через систему его показателей. Они представляют собой совокупность критериев количественной оценки уровня конкурентоспособности. Для потребителя наиболее значимыми являются экономические критерии (цена, цена эксплуатации). Но немалое значение имеют качественные характеристики товара.

Проведем анализ конкурентоспособности основных строительных материалов и сэндвич-панелей. Необходимо выявление преимуществ любого строительного материала и создание фактической базы для определения технико-экономической эффективности их использования.

Известны методы оценки конкурентоспособности: интегральный, параметрический, сопоставления адаптивности и инновационности, метод расчета единичных и групповых показателей, расчет уровня конкурентоспособности, рейтинговая оценка и др. [2].

Наиболее обоснованным по формализации является метод многокритериального ранжирования, суть которого заключается в использовании функции принадлежности. Эта функция определена в интервале 0...1 и применяется в качестве безразмерной шкалы для оценки уровня параметров сравниваемых объектов. Каждому фактическому значению функции придается конкретный экономический смысл, связанный с уровнем конкурентоспособности исследуемого способа. Значение функции

принадлежности, равное 0, соответствует неприемлемому уровню параметра; значение функции принадлежности, равное 1, – полностью приемлемому. Наивысшее значение имеет тот материал, у которого наибольший суммарный результат по всем однонаправленным показателям. После этого в соответствии с разработанным интервалом от 0 до 1 определяется уровень конкурентоспособности строительного материала.

Для сравнения конкурентоспособности исследуемых материалов необходимо найти положение на шкале от 0 до 1, которое займет каждый материал. Чем выше значение агрегирующей функции и чем ближе оно к 1, тем выше конкурентоспособность строительного материала по показателям, характеризующим качественные свойства.

Значение агрегирующей функции – среднее геометрическое значение агрегирующих функций принадлежности по различным группам параметров.

Согласно существующим методикам агрегирующая функция определяется по каждой из групп показателей и является средней геометрической значений аппроксимирующих функций, на основании которой выводится агрегирующая функция принадлежности [4].

В качестве исследуемых показателей, которые достаточно полно оценивают и характеризуют строительные материалы, выделены следующие группы:

– *технологические характеристики строительных материалов*, к которым относятся: плотность, теплопро-

водность, срок эксплуатации, водопоглощение, предел прочности при сжатии;

– *экономические характеристики строительных материалов* – стоимость 10 м² стены из каждого строительного материала с учетом затрат на связующие материалы и подготовительные работы.

Каждый из показателей необходимо оценить с точки зрения функции принадлежности, т. е. найти максимальное и минимальное значения данного показателя и сопоставить их со шкалой, которая приведена ниже. Далее нужно рассчитать коэффициенты аппроксимирующих функций, найти значение функции в точках, соответствующих значениям показателей, агрегирующие функции по группам показателей и лишь затем определить агрегирующую функцию принадлежности.

Используемый прием решения многокритериальной задачи ранжирования строительных материалов разного состава разбит на следующие этапы.

Этап 1. Задается функция принадлежности μ_i^j , значение которой характеризует степень удовлетворения потребности строительного материала в i -й характеристике j -м показателе. Причем если функция равна 0, то значение i -й характеристики неудовлетворительно, а если 1, то потребность в i -й характеристике удовлетворена полностью. Любой исследуемый параметр может быть включен в функцию принадлежности и должны быть заданы максимальные и минимальные его значения.

В качестве примера рассмотрим показатель, оценивающий технологические характеристики строительных материалов, а именно его теплопроводность.

Для строительных отделочных материалов за минимальное значение теплопроводности возьмем 0 Вт/(м²·К) (при таком значении функция принадлежности равна 0) и 1,15 Вт/(м²·К) – для 1.

Этап 2. Определяются значения выбранных показателей характеризующих строительных материалов, соответствующие узловым значениям функции принадлежности, что способствует использованию данной функции для оценки параметров различной размерности и порядка.

Для нашего показателя значения функции будут следующими: 0–0; 0,2–0,23; 0,37–0,425; 0,63–0,724; 0,8–0,92; 1–1,15.

Этап 3. На основе полученных значений рассчитываются коэффициенты аппроксимирующих функций для каждого показателя путем построения степенной функции 3-го порядка вида

$$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d.$$

С помощью встроенных в Excel (пакет решений) опций подбираются значения коэффициентов a , b , c , d для данного показателя и одновременно строится график функции, наиболее приближенный к графику шкалы. Затем определяются значения функции для конкретных показателей (рис. 1).

Для показателя теплопроводности функция преобразуется в вид

$$Y = -0,000083038x^3 - 0,000148208x^2 - 0,869498x + 0,000004497.$$

Этап 4. Подставляются в полученные аппроксимирующие функции значения показателей и находятся значения функции принадлежности.

Для значения теплопроводности 1,15 Вт/(м·К) (соответствует силикатному кирпичу) функция принимает значение, равное 0,9999; для блоков из керамзитобетона значение теплопроводности составляет 0,7 Вт/(м·К), а значение функции 0,6087; для сэндвич-панелей значение теплопроводности 0,16 Вт/(м·К), а значение функции 0,1391.

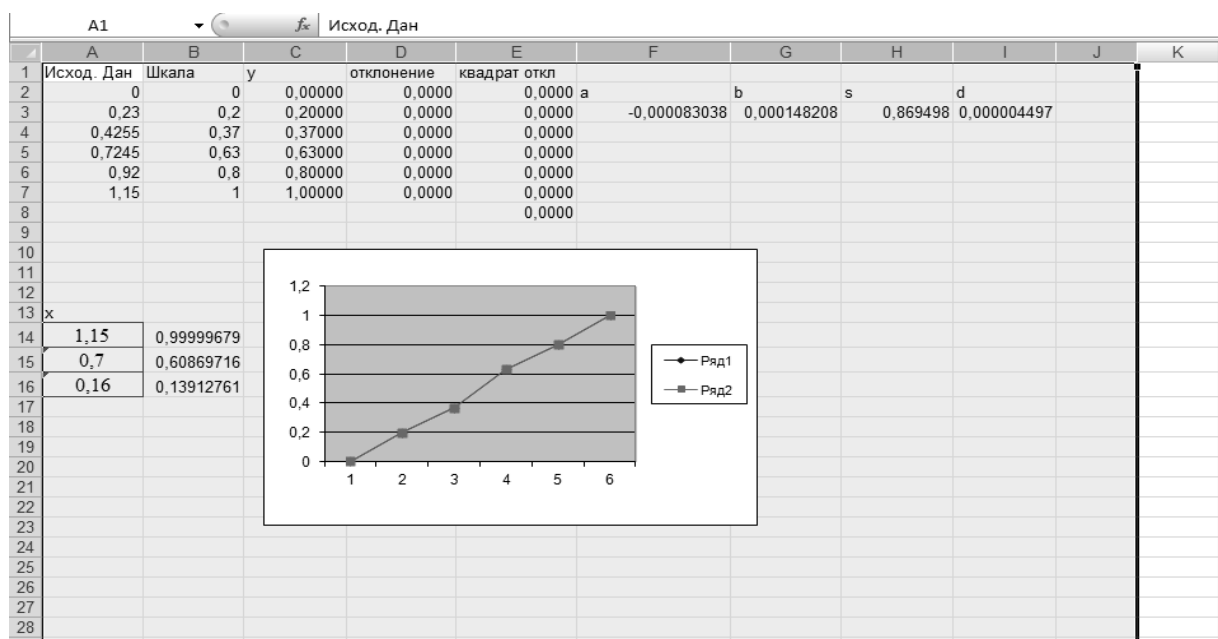


Рис. 1. Значение функции

Этап 5. Характеристики разбиваются на группы. Для каждой из групп находят агрегирующие функции μ_{π}^j и $\mu_{\text{эк}}^j$, которые предполагается рассчитывать как среднее геометрическое значений функции принадлежности по отдельным признакам, т. е.

$$\mu_{\text{эк}}^j = \sqrt[S_{\text{эк}}]{\mu_{1\text{эк}}^j \cdot \dots \cdot \mu_{S_{\text{эк}}}^j};$$

$$\mu_{\pi}^j = \sqrt[S_{\pi}]{\mu_{1\pi}^j \cdot \dots \cdot \mu_{S_{\pi}}^j},$$

где $S_{\text{эк}}$ и S_{π} – количество показателей в группе.

Этап 6. Рассчитывается показатель конкурентоспособности строительных материалов как произведение агрегирующих функций. Более конкурентоспособным является материал, имеющий наибольший результат.

Произведем расчет уровня конкурентоспособности строительных материалов предлагаемым методом.

Исходные данные приведены в табл. 4.

Табл. 4. Значение показателей для отделочных строительных материалов

Показатель	Кирпич строительный силикатный	Строительный блок керамзитобетон	Сэндвич-панели
<i>Технологические параметры</i>			
Плотность, кг/м ³	1700...1950	900...1200	40...400
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,85...1,15	0,5...0,7	0,019...0,16
Срок эксплуатации, лет	120	120	50
Водопоглощение, % от объема	16	18	0...2,1
Предел прочности при сжатии, МПа	5...30	3,5...7,5	0...1
<i>Экономические параметры</i>			
Стоимость 10 м ² стены, белорус. р.	27 238 180	23 156 000	5 340 000

Выявим уровень конкурентоспособности трех строительных материалов, воспользовавшись вышеприведенным методом. Значения параметров, соответствующие узловым точкам функции принадлежности, и коэффициенты аппроксимирующих функций для анализируемых показателей сведен в табл. 5.

В табл. 6 приведены значения функции принадлежности по каждому показателю, характеризующему определенный строительный материал, а также найдены значения агрегирующих функций по группам показателей и составлена агрегирующая функция принадлежности для различных строительных материалов.

Табл. 5. Значения параметров, соответствующие узловым точкам функции принадлежности, и коэффициенты аппроксимирующих функций

Показатель	Значение показателя μ						Коэффициент аппроксимирующих функций			
	0,00	0,2	0,37	0,63	0,8	1	a	b	c	d
Плотность, кг/м ³	400	720	992	1408	1680	2000	0,000000000	0,000000021	0,00000000022	0,0000000000023
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0	0,23	0,425	0,724	0,92	1,15	-0,000083038	0,000148208	0,869498	0,000004497
Срок эксплуатации, лет	50	64	75,9	94,1	106	120	-0,000000730	0,000196658	-0,004887	-0,093137650
Водопоглощение, % от объема	18	14,8	12,08	7,92	5,2	2	-0,000027902	0,000835247	-0,069417	1,13860348
Предел прочности при сжатии, МПа	1	6	11,1	18,9	24	30	-0,000006774	0,000231905	0,032869	-0,01975982
Стоимость 10 м ² стены, млн белорус. р.	30	24	18,9	11,1	6	0	-0,000004226	0,000171837	-0,034780	0,998708772

Табл. 6. Значения функции для каждого показателя и агрегирующей функции принадлежности строительных материалов

Показатель	Кирпич строительный силикатный		Строительный блок керамзитобетон		Сэндвич-панели	
	x	μ	x	μ	x	μ
1 Технологические характеристики						
1.1 Плотность, кг/м ³	1950	0,988	1200	0,263	400	0,012
1.2 Теплопроводность, Вт/(м·К)	1,15	0,999	0,7	0,609	0,16	0,139
1.3 Срок эксплуатации, лет	120	0,819	120	0,891	50	0,063
1.4 Водопоглощение, % от объема	16	0,127	18	0,003	2,1	0,996
1.5 Предел прочности при сжатии, МПа	30	0,992	7,5	0,237	1	0,013
2 Экономические характеристики						
2.1 Стоимость 10 м ² стены, млн белорус. р.	27,2	0,095	23,2	0,232	5,3	0,819
Агрегирующая функция технологических показателей		0,298		0,159		0,106
Агрегирующая функция экономических показателей		0,095		0,232		0,819
Агрегирующая функция принадлежности		0,168		0,192		0,295

Если потребитель будет осуществлять выбор материала, ориентируясь только на технические характеристики, то было бы логично остановить свой выбор

на таком материале, как строительный кирпич, т. к. значение агрегирующей функции по техническим параметрам имеет для него наиболее высокое значе-

ние – 0,298, а агрегирующая функция по техническим параметрам для блоков 0,159 и сэндвич-панелей 0,106 – очень близкие значения, однако ниже.

В качестве основных параметров выделяют не только технические характеристики, но и экономические показатели, в частности, стоимость 10 м² стены из каждого материала соответственно. Поэтому нужно оценить результаты агрегирующей функции по экономическим параметрам. Здесь преобладают сэндвич-панели, значение агрегирующей функции для которых – 0,819.

В связи с вышесказанным необходимо свести агрегирующую функцию по техническим и экономическим показателям к единому агрегирующему значению, чтобы окончательно убедиться в превосходстве какого-либо из строительных материалов, и расчеты доказывают, что лидером среди данных конкурирующих материалов являются сэндвич-панели (0,295).

В результате исследований можно

утверждать, что сэндвич-панели – серьезный и конкурентный товар на рынке строительных материалов.

В расчетах не учитывали много сложных и затратных этапов в строительстве из кирпича силикатного и строительного блока, связанных с подготовкой и сооружением зданий из них, рытьем котлованов, возведением фундаментов, использованием дорогой техники и высококвалифицированных специалистов. Если учитывать в смету затраты на эти операции и монтажные работы, то агрегирующая функция по экономическим показателям может еще больше увеличиться и измениться в пользу сэндвич-панелей.

Не все сооружения должны и могут служить долго, есть ряд строений, которые должны быть построены быстро и недорого. В таких случаях на первое место выходят такие строительные материалы, как сэндвич-панели – конкурентный строительный материал на современном рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СТБ 1806-2007.** Панели металлические трехслойные стеновые с утеплителем из пенополистирола. Технические условия. – Минск : Госстандарт, 2008. – 273 с.
2. **Асаул, А. Н.** Реконструкция и реставрация объектов недвижимости : учебник / А. Н. Асаул, Ю. Н. Казаков, В. И. Ипанов. – СПб. : Гуманистика, 2005. – 288 с.
3. **Гриневич, М. Н.** Многокритериальная оценка конкурентоспособности предприятия / М. Н. Гриневич, Н. В. Зеленковская // Проблемы экономики и организации производственных и социальных систем : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Минск : Университетское, 2001. – С. 221–227.
4. **Гриневич, М. Н.** Производственная стоимость и конкурентоспособность предприятия : монография / М. Н. Гриневич, В. А. Устинович, Н. В. Зеленковская. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2004. – 208 с.
5. **Лапин, Г. Н.** Оценка конкурентоспособности строительных организаций / Г. Н. Лапин // Экономика строительства. – 2000. – № 7. – С. 31–34.
6. **Родионова, Л. Н.** Оценка конкурентоспособности продукции / Л. Н. Родионова, О. Г. Кантор, Ю. Р. Хакимова // Маркетинг в России и за рубежом. – 2000. – № 1. – С. 65–77.

Статья сдана в редакцию 22 апреля 2015 года

Ольга Васильевна Голушкова, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-22-57-26.

Светлана Леонидовна Комарова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-33-44-51.

Дарья Дмитриевна Янович, студент, Белорусско-Российский университет.

Olga Vasilyevna Golushkova, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-22-57-26.

Svetlana Leonidovna Komarova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-293-33-44-51.

Darya Dmitriyevna Yanovich, student, Belarusian-Russian University.

УДК 624.075.23:624.012.45

А. А. Давиденко, М. А. Давиденко, А. Н. Бамбура, В. Б. Березин, А. П. Пилипенко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ
ИЗГИБЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ**

UDC 624.075.23:624.012.45

A. A. Davydenko, M. A. Davydenko, A. N. Bambura, V. B. Berezin, A. P. Pilipenko

**STUDY OF DEFORMATION AND FAILURE OF REINFORCED CONCRETE
COLUMNS OF CIRCULAR CROSS SECTION DURING TRANSVERSE BENDING
BY USING THE DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD**

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных колонн круглого сечения на поперечный изгиб и определены деформации поверхности колонны с использованием метода корреляции цифровых изображений.

Ключевые слова:

железобетонная колонна, круглое сечение, поперечный изгиб, корреляции цифровых изображений.

Abstract

The article presents the results of experimental studies of reinforced concrete columns of circular cross section during transverse bending, with the strains on the surface of concrete columns being determined by using the digital image correlation method.

Key words:

reinforced concrete column, circular section, transverse bend, digital image correlation.

Расчет прочности изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов круглого, кольцевого сечений выполняется с применением метода [1]. Расчетные формулы данного метода получены с учетом прямоугольных эпюр напряжений в бетоне и арматуре сжатой и растянутой зон. С некоторыми упрощениями этот метод вошел в нормы проектирования [2]. Современные нормативные документы [3–7] рекомендуют выполнение расчетов прочности нормальных сечений указанных элементов на базе нелинейной деформационной модели. Метод основан на использовании нелинейных

диаграмм деформирования материалов и линейного закона распределения деформаций бетона и арматуры по высоте сечения элемента. Исследования железобетонных колонн при поперечном изгибе, в условиях совместного действия поперечного изгиба и продольных сжимающих сил проводятся, главным образом, на элементах прямоугольного сечения. Между тем подобные исследования необходимы для колонн, имеющих круглое сечение (здания, расположенные в сейсмоопасных зонах, буронабивные сваи подпорных стен, противооползневых сооружений, фундаментов с глубокими технологическими тоннелями),

воспринимающих значительное горизонтальное давление грунта.

Далее приведены результаты экспериментальных исследований колонн круглого сечения $\varnothing 190$ мм с продольным армированием в виде шести стержней арматуры $\varnothing 10$ A240C и поперечным спиральным армированием из арматурной проволоки $\varnothing 4$ ВрI с шагом 100 мм. Для изготовления образцов ис-

пользовали бетон класса С 25/30. Образцы для испытаний были разделены на три серии в зависимости от устанавливаемого пролета среза, равного диаметру колонны, 1,5 диаметра колонны, двум диаметрам колонны за вычетом защитного слоя бетона 30 мм. Длина образцов колонн составляла 1000 мм. Было испытано по три образца каждой серии (рис. 1).



Рис. 1. Колонна круглого сечения после проведения испытаний

В качестве оборудования использовали испытательную машину WERKSTOFFPROFMASHINEN L5IPZI6 с максимальным усилием 20 т. Для установки колонн в горизонтальное положение и возможности передачи поперечной нагрузки были изготовлены опоры из половин стальных труб по диаметру колонн.

Исследование деформаций бетона в зоне поперечного изгиба выполняли с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 10^{-3} мм и нового метода корреляции цифровых изображений (КЦИ) [8–11], представленного в виде программного пакета. Программный пакет для метода КЦИ оснащался цифровой камерой Casio Exilim Pro EX-F1, съемка производилась с расстояния

1,5 м, при этом влиянием поперечного перемещения балки от/в направлении камеры можно было пренебречь. В основе метода КЦИ лежит сравнение двух участков изображения (рис. 2): базового и деформированного, а именно поиск положения участка базового изображения в деформированном изображении, основываясь на некоторой мере соответствия.

В качестве меры сравнения устанавливается некоторая скалярная величина, далее вычисляется локальный оптимум этой меры методами нелинейной оптимизации. Также принимается во внимание и изменение формы самого участка – задается функция формы, как и в методе конечных элементов. В итоге в результате работы алгоритма по-

лучается множество перемещений данных подобластей. Это множество представляет собой поле перемещений базового изображения. Из полученного

поля перемещений дифференцированием с дальнейшим использованием тензора Лагранжа определяется поле деформаций.



Рис. 2. Определение перемещения участка в деформированном изображении

Перед испытаниями на поверхность бетона с помощью матовой черной краски наносили дискретные точки как по сетке, так и случайным образом (рис. 3). Далее проводили фото-

графирование недеформированного (базового) и последующих изображений (под нагрузкой) исследуемого участка колонны.

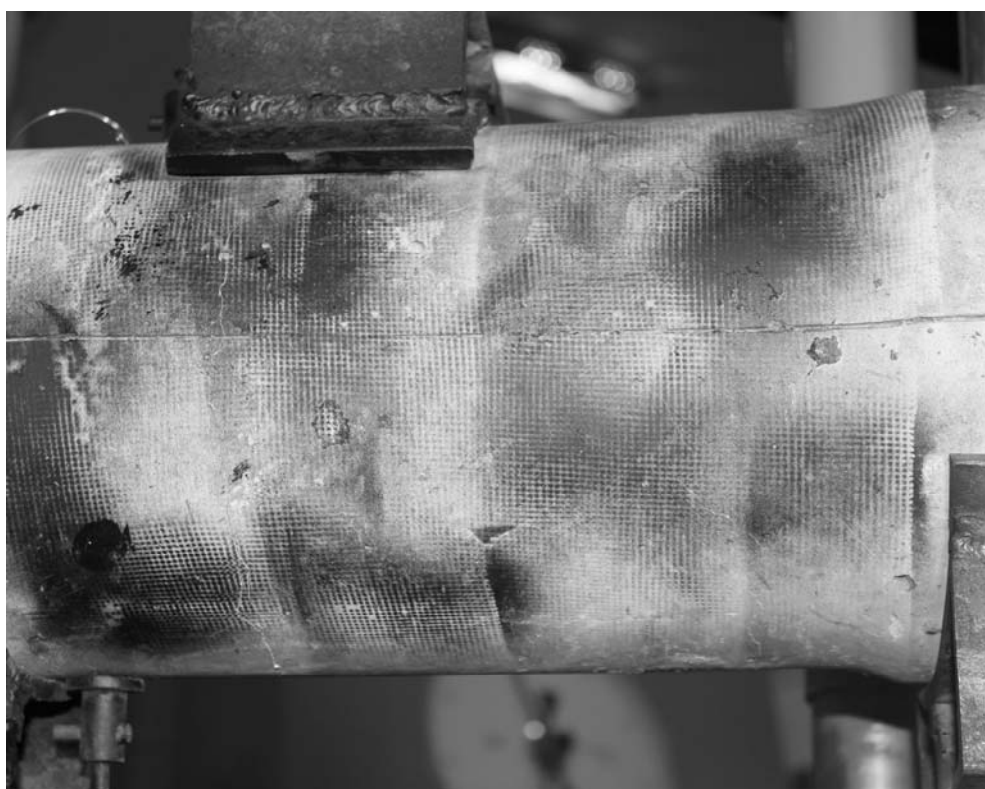


Рис. 3. Нанесение дискретных точек на поверхность бетона для оцифровки изображения и определения деформаций с помощью конечно-элементного анализа

Последующая обработка данных с помощью специального программного комплекса позволила определять деформации бетона в процессе нагружения на каждой стадии деформирования, фиксировать образование и развитие трещин, практически получить полную кинематическую картину деформирования и разрушения элемента при поперечном изгибе. Последовательность методики: напыление матовой краски на поверхность бетона, установка светодиодных прожекторов (2 шт.), фиксация каждого этапа нагружения с помощью фотокамеры, разбивка зоны исследований на конечные элементы, определение деформаций в каждом подэлементе изображения и визуализация деформаций.

Результаты испытаний показали, что первыми при поперечном изгибе

появлялись нормальные трещины в растянутой зоне (рис. 4) в месте приложения усилия при нагружении, примерно, $0,33P_{\text{разр}}$ и деформации в сжатой зоне $\epsilon_b = 41 \cdot 10^{-5} \dots 53 \cdot 10^{-5}$. Образование наклонной трещины начиналось с отклонения нормальной трещины по направлению к месту приложения нагрузки и деформациях на сжатой фибре, превышающих $100 \cdot 10^{-5}$. При этом процесс уменьшения высоты сжатой зоны происходит так же, как и в нормальном сечении. Далее с достижением главными растягивающими напряжениями бетона в пролете среза предела прочности на растяжение происходит образование наклонной трещины с ее началом в растянутой зоне и окончанием в месте наименьшей высоты сжатой зоны.

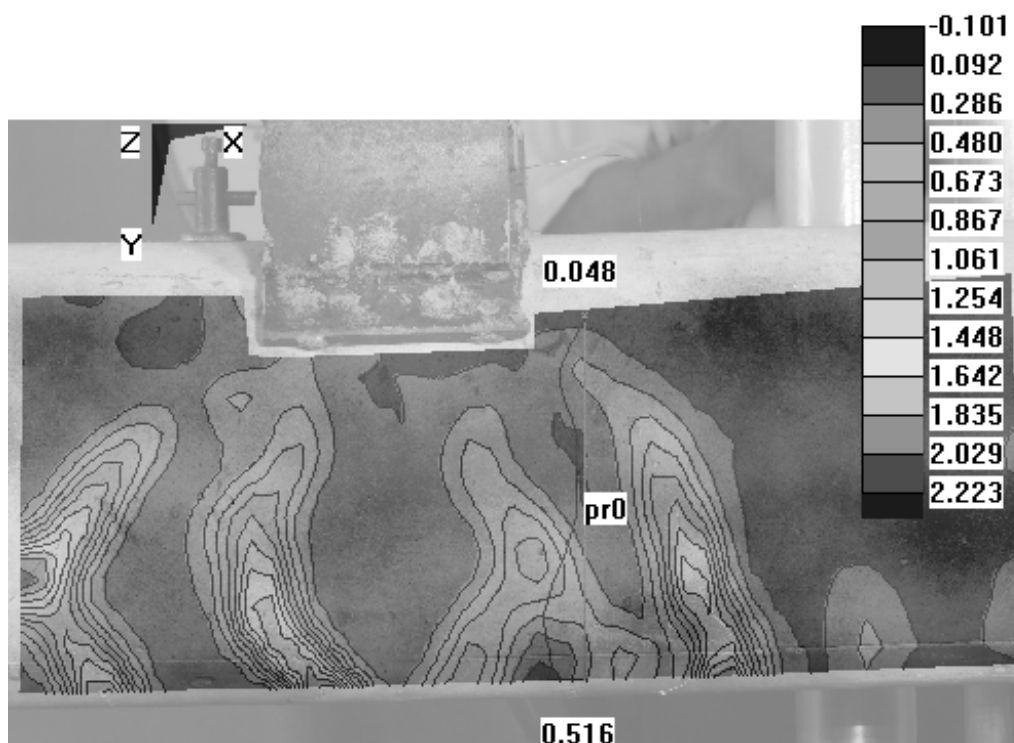


Рис. 4. Начало образования нормальных трещин при поперечном изгибе

Полученное методом корреляции цифровых изображений распределение деформаций, зафиксированное перед моментом разрушения, позволило вы-

явить причину образования наклонной трещины как результат локального достижения предела текучести в нижней продольной арматуре в одной из ранее

образованных нормальных трещин (см. рис. 4). Далее с преобладающим ростом раскрытия одной из нормальных трещин происходит резкое уменьшение высоты сжатой зоны над этой трещиной и перераспределение усилий в элементе с нижней продольной арматуры на вышерасположенные продольные стержни, а также поперечную арматуру. При достаточном поперечном армировании и соответствующем шаге начинается раскрытие наклонной трещины (или трещин). При отсутствии поперечной арматуры либо при достижении предела текучести в поперечных стержнях (их разрыве) происходит процесс разрушения по наклонному сечению, показанный на рис. 5.

Как следует из проведенных опы-

тов, влияние спирального поперечного армирования увеличивает несущую способность круглых сечений до 43 % (рис. 6). Вместе с тем количество продольной арматуры, расположенной в растянутой и сжатой зонах сечения, также оказывает существенное влияние на предельную поперечную силу для элементов круглых сечений. Зависимость влияния процента армирования продольной арматуры на несущую способность по наклонному сечению для круглых элементов диаметром 190 мм в сопоставлении с подобным влиянием на прямоугольные элементы, размером 100×180 и 100×200 мм по данным опытов [12] при пролете среза $2h_0$ ($2\varnothing$) приведена на рис. 7.

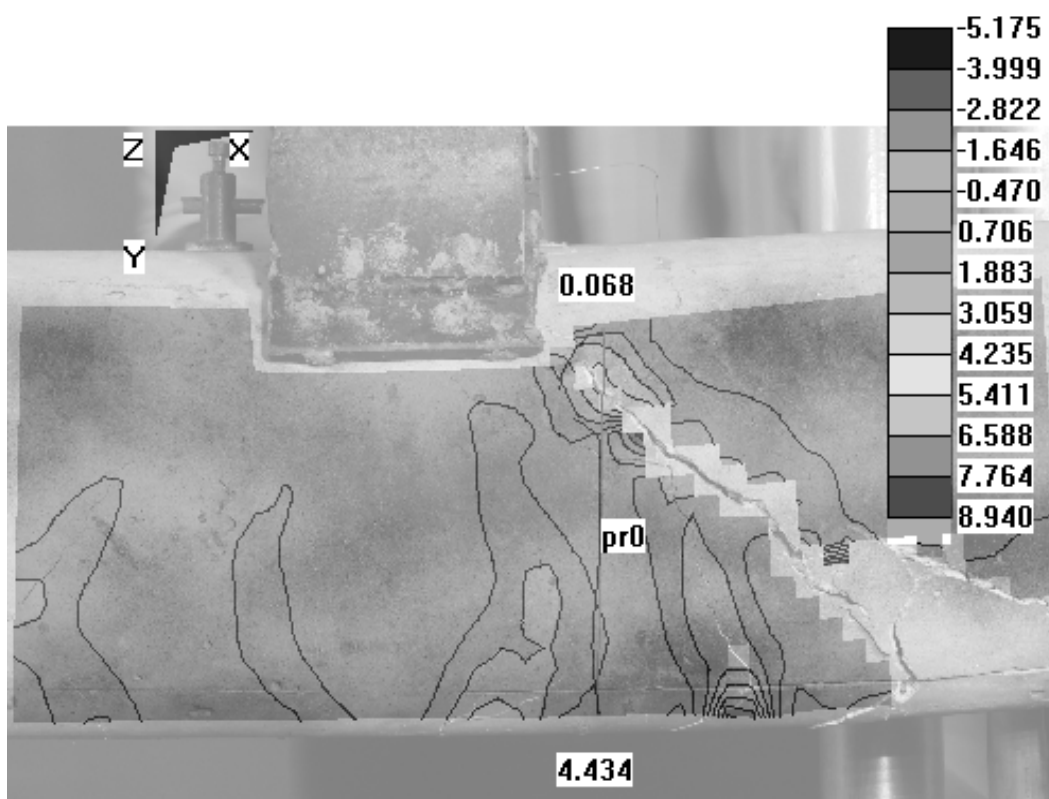


Рис. 5. Процесс разрушения колонны по наклонному сечению

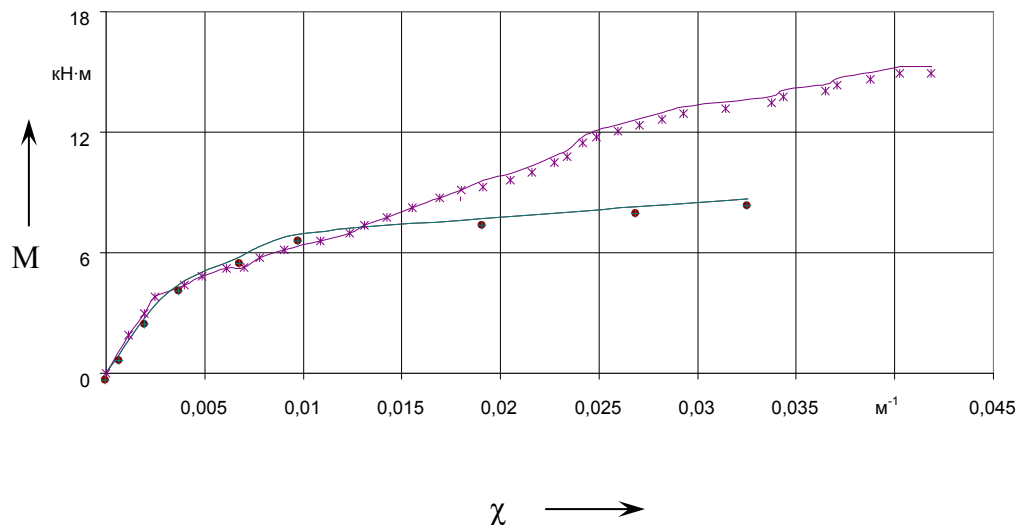


Рис. 6. Зависимости «момент – кривизна» для элементов круглого сечения с поперечной арматурой и без поперечной арматуры

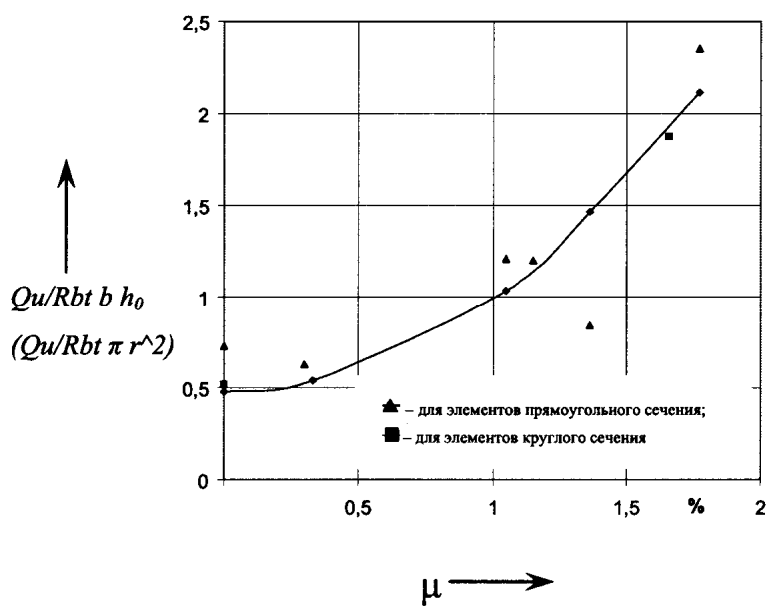


Рис. 7. Экспериментальная зависимость влияния процента армирования продольной арматуры на несущую способность наклонного сечения при пролете среза $2h_0$ mm

В отношении нагельного эффекта продольной арматуры, особенно при многорядном армировании, следует отметить, что данный эффект проявляется после достижения предела текучести в стержнях, наиболее удаленных от сжа-

той зоны, и после начала раскрытия наклонной трещины – в стержнях, расположенных выше по сечению с напряжением ниже предела текучести.

Выводы

Приведенные результаты исследований свидетельствуют, что методика расчета несущей способности по поперечной силе как круглых сечений, так и прямоугольных элементов с многорядным армированием должна учитывать влияние продольного армирования.

Исследования процесса разрушения с использованием метода корреляции цифровых изображений показали необходимость применения деформационного подхода к нахождению усилий в продольных и поперечных стержнях арматуры, не достигающих предельных значений, и оценки несущей способности наклонного сечения по соответствующей деформационной модели с определением деформаций в бетоне сжатой зоны.

Бесконтактный метод корреляции цифровых изображений обладает широкими возможностями при нахождении поля деформаций, минимальными требованиями к оборудованию, отличается простотой и достаточной точностью — до 0,004 % абсолютной погрешности при определении деформации, дает возможность анализа быстротечных процессов при разрушении с помощью высокоскоростной камеры.

Деформации, полученные методом корреляции цифровых изображений, соответствовали деформациям, определяемым по приборам, а характер разрушения (см. рис. 5) практически точно соответствовал реальной картине разрушения (см. рис. 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баташев, В. М. Прочность, трещиностойкость и деформации железобетонных элементов с многорядным армированием / В. М. Баташев. — Киев : Будівельник, 1978. — 120 с.
2. Баташев, В. М. Расчет прочности элементов кольцевого сечения по СНиП II-21-75 / В. М. Баташев // Бетон и железобетон. — 1976. — № 12. — С. 29–31.
3. Бамбура, А. Н. Общий метод оценки напряженно-деформируемого состояния и несущей способности предварительно напряженных железобетонных элементов круглого сечения по деформационной модели / А. Н. Бамбура, Е. В. Дорогова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2014. — № 3. — С. 105–113.
4. Бамбура, А. М. Несуча здатність попередньо напружених залізобетонних елементів кругового перерізу за деформаційною моделлю та залежністю / А. М. Бамбура, О. В. Дорогова // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. — Днепропетровск : ПГАСА, 2013. — Вып. № 69. — С. 34–37.
5. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. — Київ : Мінрегіонбуд, 2009. — 97 с.
6. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного преднапряжения арматуры. — М. : ФГУП ЦПП, 2004. — 53 с.
7. ENV 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1 : General Rules and Rules for Buildings. — Brussels : European Committee for Standardization, 1992.
8. Березін, В. Б. Дослідження поля деформації плоскої поверхні зразків матеріалів методом кореляції цифрових зображень. (Статичне навантаження) / В. Б. Березін, М. Г. Чаусов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2011. — № 2. — С. 15–20.
9. Березін, В. Б. Оптичний комплекс для безконтактного дослідження поля деформації плоскої поверхні методом кореляції цифрових зображень / В. Б. Березін, М. Г. Чаусов, Й. Й. Лучко // Вісн. Одеської державної академії будівництва та архітектури. — 2011. — Т. 41. — С. 30–39.
10. DOI: 10.1007/bf02321405. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction / H. A. Bruck [et al.] // Experimental Mechanics. — 1989. — Vol. 29, № 3. — P. 261–267.
11. Hild, F. Digital image correlation / F. Hild, S. Roux // Optical Methods for Solid Mechanics. A Full-Field Approach. — USA : Wiley, 2013. — P. 18–28.

12. **Силантьев, А. С.** Прочность изгибаемых железобетонных элементов без хомутов по наклонным сечениям с учетом параметров продольного армирования / А. С. Силантьев // Вестн. МГСУ. – 2011. – Т. 1, № 2. – С. 66–71.

Статья сдана в редакцию 12 мая 2015 года

Алексей Александрович Давиденко, ассистент, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. E-mail: a.david@ukr.net.

Михаил Александрович Давиденко, канд. техн. наук, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Тел.: +380-095-638-34-90.

Андрей Николаевич Бамбура, д-р техн. наук, проф., Научно-исследовательский институт строительных конструкций. Тел.: +380-067-238-22-34.

Валентин Борисович Березин, канд. техн. наук, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Тел.: +380-063-261-69-85.

Андрей Петрович Пилипенко, канд. техн. наук, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Тел.: +380-097-355-14-07.

Aleksey Aleksandrovich Davydenko, assistant lecturer, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. E-mail: a.david@ukr.net.

Mikhail Aleksandrovich Davydenko, PhD (Engineering), National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Phone: +380-095-638-34-90.

Andrey Nikolayevich Bambura, DSc (Engineering), Prof., State Research Institute of Steel Structures. Phone: +380-067-238-22- 34.

Valentin Borisovich Berezin, PhD (Engineering), National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Phone: +380-063-261- 69-85.

Andrey Petrovich Pilipenko, PhD (Engineering), National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Phone: +380-097-355-14-07.

УДК 625.72:528.4

Ю. А. Катькало, Н. В. Тулуевский, Д. Н. Дроздов, И. М. Дормаковский

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ТАХЕОМЕТРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАБОТ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

UDC 625.72:528.4

Y. A. Katkalo, N. V. Tuluyevskiy, D. N. Drozdov, I. M. Dormakovskiy

APPLICATION OF ELECTRONIC TACHEOMETERS TO CONTROL QUALITY OF WORK IN ROAD CONSTRUCTION

Аннотация

Рассматривается применение электронных тахеометров для определения действительных геометрических параметров автомобильных дорог при оценке качества работ. Представлены способы нахождения радиусов вертикальных кривых, крутизны откосов земляного полотна, видимости дороги на вертикальных кривых.

Ключевые слова:

автомобильная дорога, действительные геометрические параметры, контроль качества работ, электронный тахеометр.

Abstract

The paper investigates the application of electronic tacheometers to determine real geometrical parameters of motor roads in assessing the quality of work. The techniques for finding radii of vertical curves, the steepness of subgrade slopes, driving visibility on vertical curves are presented.

Key words:

motor road, real geometrical parameters, quality control, electronic tacheometer.

Введение

При строительстве автомобильной дороги выполняют операционный контроль качества работ и приемочный контроль по окончании всего строительства или отдельного участка. При контроле проверяется соответствие действительных геометрических параметров их проектным значениям. Согласно ТКП 059-2007 «Автомобильные дороги. Правила устройства» [1] контролируется качество сооружения земляного полотна, устройства дорожной одежды, установки элементов обустройства дороги и ее общие параметры.

При сооружении земляного полотна проверяют размещение осевой линии

и высотные отметки, снимаемые и отсыпаемые слои, поперечный профиль земляного полотна, водоотводные и дренажные устройства. При устройстве дорожной одежды контролируются ее слои. При общем контроле определяют видимость дороги. На рис. 1 приведены все геометрические параметры, контроль которых установлен ТКП 059-2007.

Из перечисленных параметров (рис. 2) представлены те, нахождение которых возможно с помощью электронного тахеометра.

Для определения длины прямых участков трассы, уклонов и отметок в продольном профиле, высотных отметок по оси слоев дорожной одежды, по-

перечных уклонов земляного полотна используется программное обеспечение электронного тахеометра.

Определение углов поворота трассы рассмотрено в [2].

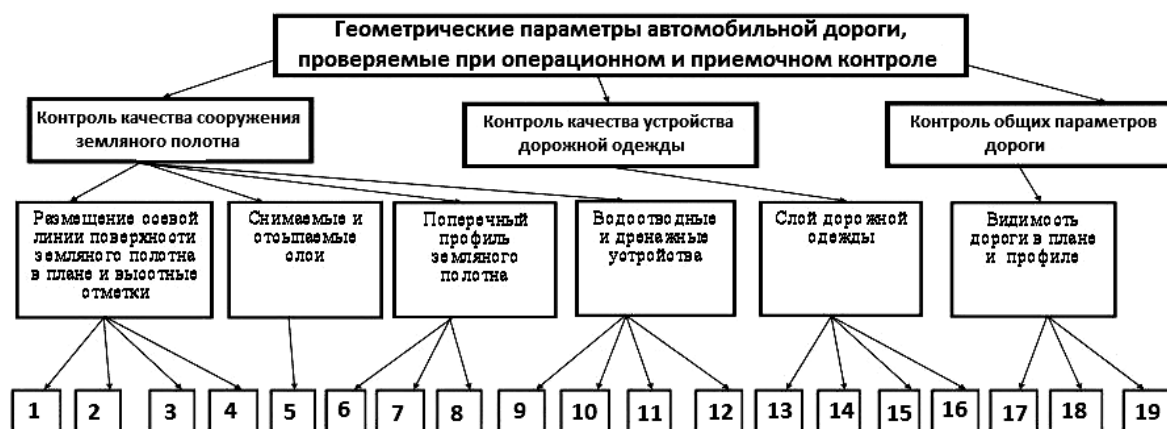


Рис. 1. Контролируемые геометрические параметры автомобильной дороги: 1 – длина прямых участков, углы поворота трассы; 2 – радиусы кривых в плане; 3 – радиусы вертикальных кривых; 4 – уклоны и отметки продольного профиля; 5 – толщина слоев; 6 – расстояние между осью и бровкой; 7 – поперечный уклон; 8 – крутизна откосов; 9 – поперечные размеры канав по дну; 10 – поперечные размеры дренажей; 11 – продольные уклоны дренажей; 12 – ширина насыпных берм; 13 – высотные отметки по оси дороги; 14 – ширина слоев; 15 – толщина слоев; 16 – поперечные уклоны; 17 – видимость на пересечениях в одном уровне; 18 – видимость на горизонтальных кривых; 19 – видимость на вертикальных кривых

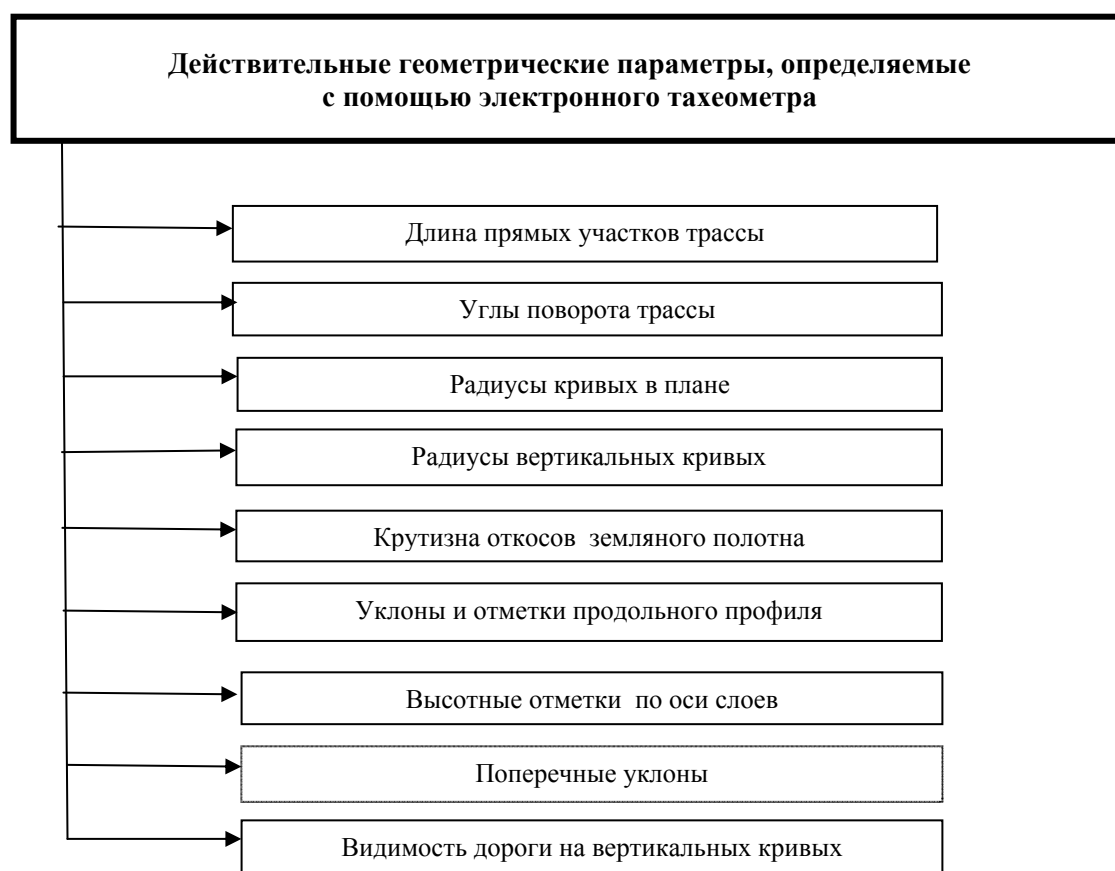


Рис. 2. Действительные геометрические параметры автомобильной дороги, определяемые с помощью электронного тахеометра

Для радиусов кривых в плане разработано несколько способов получения их с помощью электронного тахеометра: по прямоугольным координатам, по касательной и углу, по двум касательным и углу [3, 4].

Остается рассмотреть применение электронных тахеометров при определении радиусов вертикальных кривых, крутизны откосов земляного полотна, видимости дороги на вертикальных кривых.

Определение действительных радиусов вертикальных кривых

Электронный тахеометр располагают на вершине вертикальной кривой, на кромке проезжей части (рис. 3). Измеряют высоту прибора c . На некотором расстоянии d от тахеометра, на кромке проезжей части вертикально устанавливают вежу с призмным отражателем. Телескопическую вежу раздвигают так, чтобы отражатель находился на высоте прибора c .

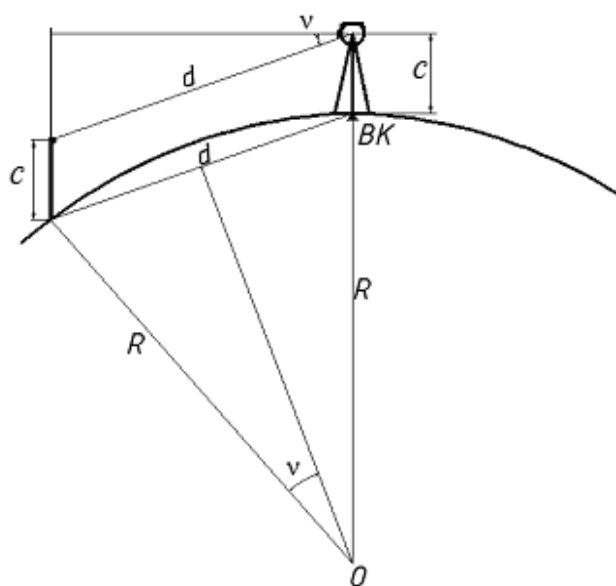


Рис. 3. Схема определения действительного радиуса вертикальной кривой

Визируют на отражатель. Измеряют расстояние от тахеометра до отражателя d и угол наклона линии визирования v .

Полученных данных достаточно, чтобы вычислить действительный радиус вертикальной кривой R .

$$R = \frac{d}{2 \sin v}. \quad (1)$$

Перед тем, как применить этот способ на практике, нужно выяснить, обеспечивается ли необходимая точность определения радиуса. Точность

эту будем оценивать средней квадратической ошибкой m_R .

Допустимую среднюю квадратическую ошибку определения радиуса вертикальной кривой $m_{\text{доп}}$ достаточно считать не превосходящей величину $R/15$. Тогда радиус вертикальной кривой может быть получен с ошибкой m_R , не превышающей допустимой $m_{\text{доп}}$.

На основании теории ошибок для выражения (1) можно записать следующее:

$$m_R^2 = \left(\frac{\partial R}{\partial d} \right)^2 m_d^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \nu} \right)^2 \frac{m_\nu^2}{\rho^2} =$$

$$= \frac{m_d^2}{4 \sin^2 \nu} + \frac{d^2 m_\nu^2 \cos^2 \nu}{4 \rho^2 \sin^4 \nu},$$

откуда

$$m_R = \frac{1}{2 \sin \nu} \sqrt{m_d^2 + d^2 \frac{m_\nu^2}{\rho^2} \operatorname{ctg}^2 \nu}, \quad (2)$$

где m_d – средняя квадратическая ошибка измерения длины линии электронным тахеометром, $m_d = 10$ мм; m_ν – средняя квадратическая ошибка измерения вертикального угла электронным тахеометром, $m_\nu = 5''$; p – число секунд в радиане.

Выполнен анализ полученного выражения (2). Результаты его представлены в табл. 1 и на рис. 4 в виде зависимостей средних квадратических ошибок m_R от величины радиуса вертикальной кривой R при разных значениях d . На рис. 4 дана также линия допустимой

средней квадратической ошибки определения радиуса $m_{\text{доп}}$.

Анализ показывает, что с увеличением расстояния d средняя квадратическая ошибка определения радиуса m_R уменьшается, а точность увеличивается. При этом имеются минимальные расстояния, обозначим их $d_{\min}$, менее которых ошибка определения радиуса превосходит допустимую ошибку $m_{\text{доп}}$. Такие расстояния и меньшие не должны назначаться. Для разных радиусов величины $d_{\min}$ приведены в табл. 2.

Аппроксимация полученных значений $d_{\min}$ дает уравнение

$$d_{\min} = 0,00073R. \quad (3)$$

Результаты анализа позволяют выделить область применения представленного способа определения радиусов вертикальных кривых (рис. 5). В пределах этой области ошибка m_R не превосходит допустимой $m_{\text{доп}}$.

Табл. 1. Средняя квадратическая ошибка в зависимости от величины радиуса R и расстояния d

$R, \text{ м}$	$m_R, \text{ М}$					$m_{\text{доп}}$
	$d, \text{ М}$					
	10	20	30	40	50	
5000	121,31	60,65	40,44	30,33	24,26	333
10000	484,92	242,46	161,64	121,23	96,98	667
15000	1090,85	545,43	363,62	272,71	218,17	1000
20000	1939,36	969,68	646,45	484,84	387,87	1333
30000	4193,99	2226,01	1454,48	1080,03	879,71	2000
40000	7756,55	3878,28	2585,52	1939,14	1551,31	2667
50000	12120,45	6060,22	4040,15	3030,11	2424,09	3333
60000	17452,11	8726,05	5817,37	4363,03	3490,42	4000
70000	23755,97	11877,99	7918,66	5938,99	4750,84	4667
Примечание – Утолщенной линией отделены недопустимые значения средней квадратической ошибки						

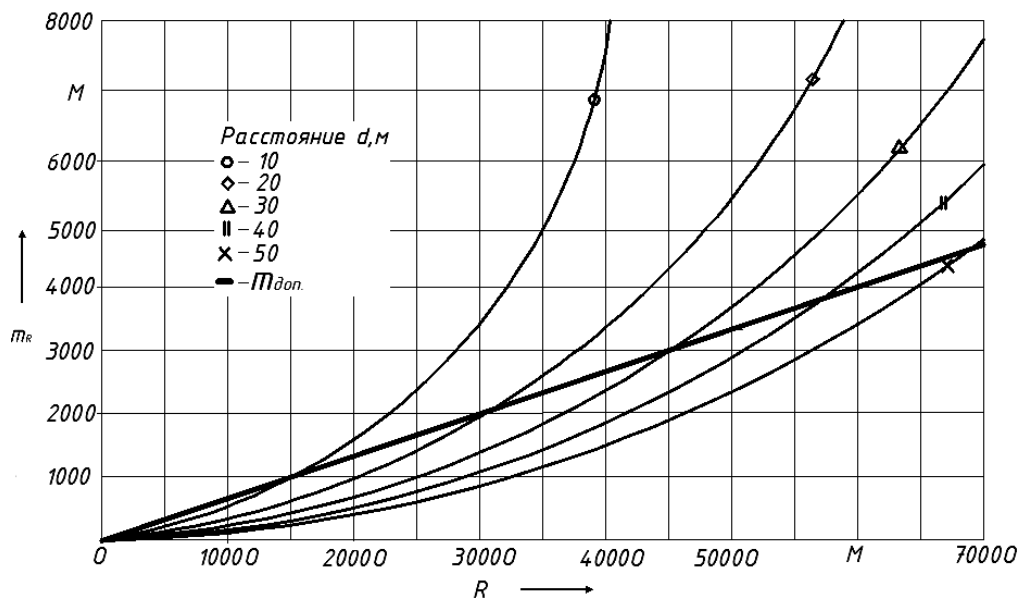


Рис. 4. Зависимость средней квадратической ошибки от величины радиуса

Табл. 2. Значения минимальных расстояний $d_{\min}$

$R, \text{ м}$	10000	15000	20000	30000	40000	50000	60000	70000
$d_{\min}, \text{ м}$	8	11	14,5	22,5	29	36,5	43,5	51

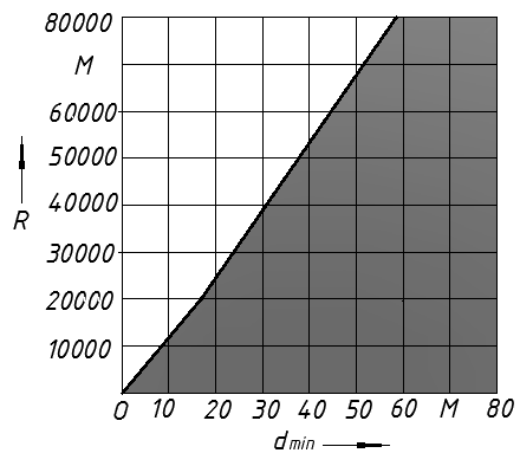


Рис. 5. Область применения способа определения радиуса вертикальной кривой

В практическом применении вначале ориентировочно принимают величину радиуса и по ней назначают по выражению (3) или по рис. 5 величину $d_{\min}$. Затем выполняют измерения для определения радиуса вертикальной кривой.

Величину радиуса получают несколько раз, последовательно перемещая вежу с отражателем вперед. За окончательный результат принимают среднее значение из нескольких измерений радиуса.

Определение крутизны откоса земляного полотна

В соответствии с ТКП 059-2007 допустимое отклонение крутизны откоса земляного полотна составляет $\pm 10\%$. Каждой крутизне откоса $1:m$ соответствует угол наклона откоса ν и уклон откоса i .

$$i = \operatorname{tg} \nu = \frac{1}{m}.$$

В табл. 3 приведены допустимые отклонения угла наклона откоса δ_ν и уклона откоса δ_i .

При определении крутизны откоса земляного полотна электронный тахеометр устанавливают на бровке земляного полотна (рис. 6). Измеряют высоту прибора c и на этой высоте располагают отражатель, прикрепленный к вехе. Ставят веху на откосе и визируют на отражатель.

Табл. 3. Допустимые отклонения крутизны откосов земляного полотна

Крутизна откосов $1:m$	Угол наклона откоса ν	Допустимое отклонение угла наклона $\pm \delta_\nu$	Уклон откоса i , %	Допустимое отклонение уклона откоса $\pm \delta_i$, %
1:1,5	33°41,5'	3°22'08"	67	$\pm 6,7$
1:1,75	29°45'	2°58'28"	57	$\pm 5,7$
1:2	26°34'	2°39'23"	50	$\pm 5,0$
1:3	18°26'	1°50'36"	33	$\pm 3,3$
1:4	14°02'	1°24'13"	25	$\pm 2,5$

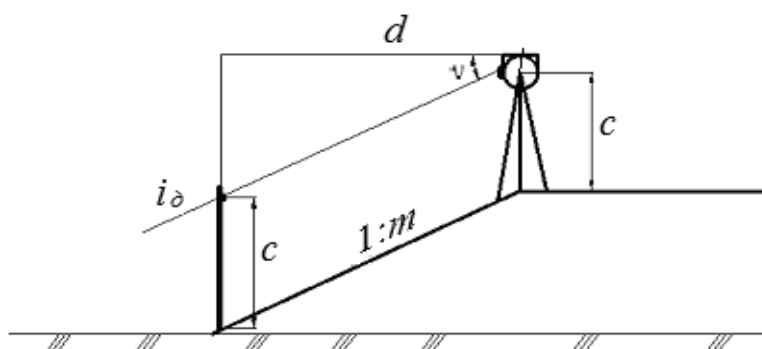


Рис. 6. Схема определения крутизны откоса электронным тахеометром

В результате одного наведения на экране тахеометра получают действительный угол откоса ν (ВК) и действительную величину уклона откоса i_δ (V%) в процентах. В скобках приведены обозначения, появляющиеся на экране тахеометра. На рис. 7 на экранах тахеометра показан угол наклона откоса $-29^\circ 44'$ и действительный уклон откоса $-57,2\%$. Для этого откоса действительное отклонение составляет $0,2\%$ при допуске для этой крутизны $5,7\%$

(см. табл. 3).

Одновременно с измерением крутизны откоса измеряют и горизонтальное проложение d до точки постановки вехи (см. рис. 6).

Применение электронного тахеометра позволяет не только оценить, соответствует или нет крутизна откоса своему проектному значению, что является при использовании шаблонов, но и определить действительную величину крутизны откоса и действительное

его отклонение. Это дает возможность получить величину досыпки или срезки грунта на откосе

$$\Delta h = (i_0 - i)d, \quad (4)$$

где i_0 – действительный уклон откоса

(измеряемый электронным тахеометром); i – проектный уклон откоса (см. табл. 3); d – горизонтальное проложение.

При необходимости крутизна откоса проверяется в нескольких местах.

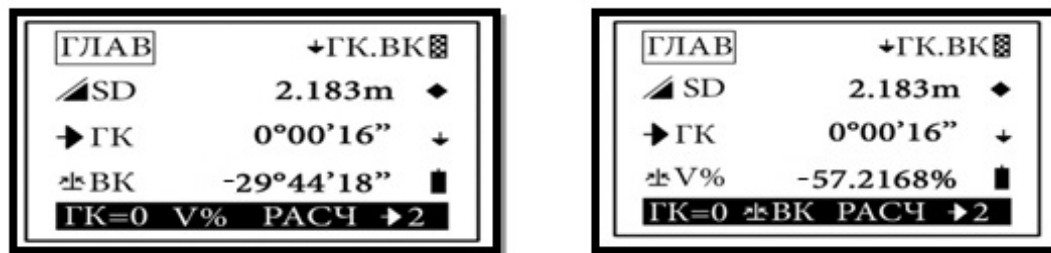


Рис. 7. Отображение на экране электронного тахеометра крутизны откоса

При определении крутизны откоса можно получить и высоту насыпи. Для этого электронный тахеометр располагается на бровке откоса насыпи, а веха с отражателем – у подошвы насыпи или, наоборот, тахеометр – у подошвы насыпи, а веха – на бровке. Высота насыпи

$$H = dtg \nu. \quad (5)$$

Подобным образом определяется и глубина выемки.

Определение видимости дороги на вертикальных кривых

Видимость в продольном профиле ограничивается выпуклыми переломами уклонов и выпуклыми вертикальными кривыми. Для таких случаев ТКП 45-3.03-19-2006 «Автомобильные дороги. Нормы проектирования» [5] задает наименьшие расстояния видимости для остановки автомобиля. В зависимости от категории автомобильной дороги эти расстояния назначают величиной от 60 до 350 м.

Для определения видимости дороги устанавливают электронный тахеометр в начале вертикальной кривой (рис. 8). Высота прибора должна соответствовать расчетному уровню глаз

водителя над поверхностью дороги h_y . На такой же высоте располагают призмочный отражатель, прикрепленный к вехе. Для водителя легкового автомобиля высоту h_y принимают равной 1,2 м, а грузового – 1,5 м [6].

Для работы удобно использовать веху с минипризмой. Длина такой вехи с отражателем составляет 1,30 м. При определении расстояния видимости поверхности дороги для остановки автомобиля S_1 веху удерживают отражателем книзу. Для этого к отражателю прикрепляют наконечник, которым он опирается на поверхность покрытия проезжей части. Последовательно перемещают веху по вертикальной кривой. Наблюдая в зрительную трубу электронного тахеометра за отражателем, наблюдатель фиксирует момент, когда он при дальнейшем перемещении перестает быть видимым. Таким образом, получается точка касания визирным лучом поверхности дороги – точка 1. Визируя на отражатель, измеряют действительное расстояние S_1 .

Перемещают электронный тахеометр вперед на 10...20 м и вновь определяют расстояние видимости S_1 . Повторяя такие действия, доходят до вершины кривой. Определяют участок вер-

тикальной кривой с наименьшим расстоянием видимости для остановки автомобиля. Полученное расстояние ви-

димости сравнивают с нормативным, приведенным в [5], и дают ему оценку.

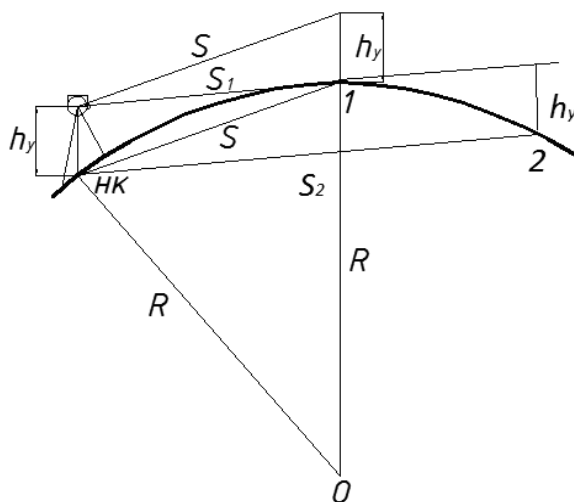


Рис. 8. Определение действительного расстояния видимости на вертикальной кривой с помощью электронного тахеометра

Подобную работу выполняют и для другой ветви выпуклой кривой.

При определении расстояния видимости встречного автомобиля S_2 вежу удерживают отражателем кверху, который находится на высоте h_y . Наблюдая в зрительную трубу электронного тахеометра за перемещением вежи, наблюдатель замечает момент, когда отражатель перестает быть видимым – точка 2. Такое положение вежи указывает на расстояние видимости встречного автомобиля S_2 . Измеряют это расстояние и дают ему оценку.

Выводы

1. Рассмотрено применение электронных тахеометров для определения действительных геометрических пара-

метров при контроле качества строительства автомобильных дорог.

2. Представлен разработанный способ определения действительных радиусов вертикальных кривых автомобильных дорог по результатам измерений расстояний и вертикальных углов. Выведена зависимость для оценки точности получения радиусов вертикальных кривых. Установлены условия, при соблюдении которых обеспечивается необходимая точность нахождения радиуса.

3. Разработаны методики применения электронных тахеометров при определении крутизны откосов земляного полотна и расстояний видимости дороги и встречного автомобиля на вертикальных кривых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТКП 059-2007. Автомобильные дороги. Правила устройства. – Минск, 2007. – 94 с.
2. Каткало, Ю. А. Инженерная геодезия. Разбивка трассы и земляного полотна автомобильных дорог / Ю. А. Каткало, А. А. Каткало. – Могилев, 2003. – 152 с.
3. Определение радиусов закруглений автомобильных дорог способом прямоугольных координат / Ю. А. Каткало, А. А. Каткало, П. Н. Гобралев, К. Н. Головков // Вестн. МГТУ. – 2005. – № 1. – С. 98–102.

4. Определение действительных радиусов на закруглениях автомобильных дорог электронным тахеометром / Ю. А. Каткало, Е. Н. Подстрелова, А. С. Терещенко, Н. В. Тулуевский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 3. – С. 89–95.
5. **ТКП 45-3.03-19-2006.** Автомобильные дороги. Нормы проектирования. – Минск, 2006. – 42 с.
6. Автомобильные дороги : проектирование и строительство / Под ред. В. Ф. Бабкова. – М., 1983. – 280 с.

Статья сдана в редакцию 25 марта 2015 года

Юрий Анатольевич Каткало, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-298-47-41-64.
Николай Владимирович Тулуевский, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-293-15-02-34.
Дмитрий Николаевич Дроздов, студент, Белорусско-Российский университет.
Иван Михайлович Дормаковский, студент, Белорусско-Российский университет.

Yury Anatolyevich Katkalo, Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-298-47-41-64.
Nikolai Vladimirovich Tuluyevskiy, senior lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-293-15-02-34.
Dmitry Nikolayevich Drozdov, student, Belarusian-Russian University.
Ivan Mikhailovich Dormakovskiy, student, Belarusian-Russian University.

ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3(48) 2015

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 07.09.2015. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 17,67. Уч.-изд. л. 18,0. Тираж 100 экз. Заказ 4609.

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