

## Белорусско-Российского университета

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

# 1 (42) 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

КАЗАКОВ А. В., ЖОЛОБОВ А. А. Прогнозирование	
и обеспечение точности токарной обработки ступенча-	
тых валов	6
КИСЕЛЕВ М. Г., ДРОЗДОВ А. В., МОСКАЛЕНКО А. В.,	
БОГДАН П.С. Влияние режимов электроконтактной	
обработки исходной поверхности проволочного инстру-	
мента на величину сил резания в процессе распилива-	
ния им материалов без использования абразивной сус-	
пензии	15
κοροτεγκά ο κνιμκόν τη καπρόν μα	
$\Omega$	
осооснности реализации кольцевого способа подачи	22
защитного газа в зону горения дуги при сварке	23
ПАШКЕВИЧ А. М. Методика расчета планетарных	
радиально-плунжерных шариковых редукторов	32
РЫНКЕВИЧ С А ХАЛКЕВИЧ И Ю Метолика	
анотом мобили и у мощиц	12
систем мобильных машин	42
ТАРАСИК В. П., ГОРБАТЕНКО Н. Н., САВИЦКИЙ В. С.	
Исследование характеристик электрогидравлических	
пропорциональных клапанов	52

ШАТУРОВ Д. Г., ШАТУРОВ Г. Ф., ЖОЛОБОВ А. А.	
Исследование точности при обработке валов в зависи-	
мости от метода настройки резца	66
ШЕЛЕГ В. К., ЛОВГАЛЕВ А. М., ЖОЛОБОВ А. А.,	
ЛЕВАНОВИЧ Н. А., ТАРАЛЕЙКО И. А. Молелиро-	
вание процесса совмещенной упрочняющей обработки	
импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся	
магнитным полем	73
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ	
АСАДЧАЯ М. В., БАЕВ А. Р., СЕРГЕЕВА О. С.,	
МАЙОРОВ А. Л. Влияние параметров технологи-	
ческого выступа на формирование акустического	
поля преобразователя поверхностных волн	85
КУШНЕР А. В., НОВИКОВ В. А. Анализ моделей	
дефектов в теоретических исследованиях магнитных	
полей рассеяния, возникающих при намагничивании	
ферромагнитных объектов	95
НОВИКОВ В. А., ШИЛОВ А. В. Границы применения	
магнитного метода контроля с использованием визуали-	
зирующей поля пленки	106
СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА	
БАБИЧ Е. М., ДОВБЕНКО В. С. Трещиностойкость	
усиленных железобетонных балок	117
БАБИЧ Е. М., РЕВИНКЕЛЬ ЙП., ФИЛИПЧУК С. В.	
Экспериментальное определение ветровой нагрузки	
на покрытие стадиона в г. Магдебурге	126
МАСЮК Г. Х., АЛЕКСИЕВЕН И. И. Влияние мало-	
цикловых знакопеременных нагрузок на процессы тре-	
щинообразования во внецентренно сжатых железобетон-	
ных элементах	136

## ОХРАНА ТРУДА. ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

## СКРИГАН А. Ю., ЗАДЕРЕЕВ Е. С., ШИЛОВА И. В.

Социалистическое наследие в пространственной струк-	
туре Красноярска	144

- 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

<b>KAZAKOV A. V., ZHOLOBOV A. A.</b> Forecasting and ensuring the accuracy of stepped shafts turning	6
KISELYOV M. G., DROZDOV A. V., MOSKALENKO A. V., BOGDAN P. S. The influence of modes of contact- initiated machining of the initial surface of a wire tool upon its cutting capacity in the process of materials cutting without abrasive slurry	15
<b>KOROTEYEV A. O., KULIKOV V. P., KADROV M. A.</b> Peculiarities of using the circular technique to supply shielding gas to the zone of arc combustion in welding	23
PASHKEVICH A. M. The procedure of the calculation of planetary radial-plunger ball reducers	32
<b>RYNKEVICH S. A., KHADKEVICH I. Y.</b> The procedure of algorithms synthesis for diagnosing hydraulic systems of mobile machines	42
TARASIK V. P., GORBATENKO N. N., SAVITSKY V. S. Investigation of the characteristics of electrohydraulic proportional valves	52
SHATUROV D. G., SHATUROV G. F., ZHOLOBOV A. A. The investigation of accuracy of shaft machining depen- ding on the method of cutter adjustment	66
SHELEG V. K., DOVGALEV A. M., ZHOLOBOV A. A., LEVANOVICH N. A., TARADEIKO I. A. Modeling of the process of combined strengthening treatment by impulse-impact rolling and a rotating magnetic field	73
INSTRUMENT MAKING	
ASADCHAYA M. V., BAEV A. R., SERGEEVA O. S., MAYOROV A. L. Impact of the technological ledge parameters on the acoustic field formation of the converter of superficial waves	85
<b>KUSHNER A. V., NOVIKOV V. A.</b> The analysis of models of defects through theoretical research of magnetic stray fields arising during ferromagnetic objects magnetization	95

<b>NOVIKOV V. A., SHILOV A. V.</b> Application limits of the magnetic method of testing by means of a field viewing film	106
<b>CIVIL ENGINEERING. ARCHITECTURE</b>	
BABICH Y. M., DOVBENKO V. S. Crack resistance of reinforced concrete beams	117
<b>BABICH Y. M., REWINKEL JP., FILIPCHYK S.V.</b> An experimental determination of the wind load acting on the roof structure of the magdeburg stadiu	126
MASYUK G. K., ALEKSIEVETS I. I. The impact of low-cycle alternating loads on the processes of crack formation in eccentrically compressed reinforced concrete components	136
LABOUR PROTECTION. ENVIRONMENT PROTECTION. GEOECOLOGY	
SKRYHAN A. Y., ZADEREYEV E. S., SHILOVA I. V. Socialist legacy in the spatial structure of Krasnoyarsk	144

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9

## А. В. Казаков, А. А. Жолобов

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ СТУПЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

## UDC 621.9

## A. V. Kazakov, A. A. Zholobov

## FORECASTING AND ENSURING THE ACCURACY OF STEPPED SHAFTS TURNING

#### Аннотация

Рассмотрены вопросы оценки и прогнозирования погрешностей обработки, возникающих вследствие деформации элементов TCP, влияния внешних силовых факторов на упругую деформацию элементов TCP при токарной обработке ступенчатых валов. Разработана математическая модель, которая позволила выявить и оценить влияние деформации заготовки, инструмента, задней и передней бабок станка на точность и форму обрабатываемых поверхностей ступенчатого вала.

#### Ключевые слова:

деформация, силы резания, технологическая система резания, токарная обработка, повышение точности, оптимизация, математическая модель, ступенчатые валы, прогнозирование, коррекция траектории движения режущего инструмента.

#### Abstract

The paper considers the problems of evaluating and forecasting processing errors caused by the deformation of elements of a technological cutting system (TCS) and the influence of external forces on elastic deformation of TCS elements when turning stepped shafts. The mathematical model has been developed, which reveals and assesses the impact of the deformation of a workpiece, of a cutting tool, and that of a headstock and a tailstock of the machine, on the accuracy and form of processed surfaces of a stepped shaft.

#### Key words:

deformation, cutting forces, technological cutting system (TCS), turning, increased accuracy, optimization, mathematical model, stepped shafts, forecasting, adjustment of the contour of the cutting tool movement.

При токарной обработке валов существенное влияние на точность формируемых поверхностей оказывает геометрическая точность технологической системы резания (ТСР) и податливость её элементов под воздействием сил резания [1–3]. Для обеспечения заданных конструктором параметров изделия необходим строгий учёт возникающих и изменяющихся в процессе обработки погрешностей.

Многими учеными проведены теоретические и экспериментальные исследования этих погрешностей, в том числе и в Белорусско-Российском университете [3–6]. Однако в этих работах не уделялось особого внимания специфике формирования погрешностей на поверхностях ступенчатых валов.

Для прогнозирования точности токарной обработки ступенчатых валов авторами сделана попытка создания математической модели, позволяющей выявить и оценить влияние деформации заготовки, инструмента, задней и передней бабок станка на точность размеров и форму обрабатываемых поверхностей ступенчатого вала.

В математической модели были учтены рекомендуемые в ранее выполненных работах [3, 4, 7–12] параметры: пространственные отклонения заготовки, погрешность установки заготовки, смещение центровых отверстий заготовки (при обработке в центрах); погрешность базирования заготовки в патроне; смещение оси задней бабки; податливость шпиндельного узла; податливость задней бабки; жесткость упругая деформация инструмента; заготовки.

Кроме того, при разработке модели было принято допущение, что материал поверхности заготовки имеет однородную структуру и равномерную твердость [3].

Рассматриваемая математическая модель имеет отличие от моделей, предлагаемых в [3, 4, 7–12]: применяется дифференциальное уравнение изогнутой оси балки для расчёта упругих деформаций, возникающих в технологической системе. Подход направлен на более полное раскрытие сущности моделирования процессов механической (токарной) обработки ступенчатых валов на станках с ЧПУ.

Основными причинами возникновения погрешностей цилиндрических поверхностей, связанных с податливостью ТСР, является влияние упругой деформации заготовки и инструмента и упругой деформации шпиндельного узла и задней бабки. Указанные факторы в разной степени сказываются на погрешностях обрабатываемой поверхности [3]. Для установления влияния различных внешних силовых факторов на упругие деформации элементов ТСР и, как следствие, на погрешности формируемых в процессе обработки цилиндрических поверхностей ниже рассмотрено общее решение дифференциального уравнения изогнутой оси балки.

Прогиб (величину упругой деформации) заготовки с учётом упругой деформации шпиндельного узла и задней бабки можно определить с помощью дифференциального уравнения изогнутой оси балки [13]

$$\Delta_{3Y(Z)}(x)'' = \frac{M_{Z(Y)}(x)}{EI(x)}, \qquad (1)$$

где  $\Delta_{3Y(Z)}(x)$  – уравнение упругих деформаций заготовки в плоскости *YOX* (*ZOX*), м; *M*(*x*) – уравнение изгибающего момента, вызванного силой резания в рассматриваемой плоскости, H·м; *EI*(*x*) – уравнение изменения жёсткости при изгибе заготовки, H·м<sup>2</sup>.

Уравнение (1) описывает закон изменения упругой деформации по всей длине обрабатываемой заготовки. Значение же упругой деформации, определяющее точность цилиндрической поверхности после механической обработки, будет находиться в точке приложения силы резания. То есть в любой момент времени в точке касания вершины резца и обрабатываемой поверхности отмечается такое значение упругой деформации заготовки, которое впоследствии оказывает влияние на точность обработанной поверхности. Для этого уравнение (1) приводится к виду, позволяющему определять значение упругой деформации в заданной точке.

Необходимо решить дифференциальное уравнение (1). Следует зафиксировать резец в произвольный момент обработки, а его действие на обрабатываемую заготовку заменить соответствующими составляющими силы резания. Таким образом, обрабатываемую заготовку можно представить с определёнными допущениями как набор участков, жёст-кость которых постоянна [14].

В процессе точения на заготовку действуют силовые факторы в виде сосредоточенных сил и изгибающих моментов, а также собственный вес заготовки как равномерно распределённая нагрузка по каждой из ступеней.

В качестве примера на рис. 1 представлен вал, содержащий N участков (ступеней) в зафиксированный момент обработки. Расстояние от правого торца заготовки до текущего положения резца обозначено через  $L_0$ , а вылет заготовки – через  $L_3$ . Пусть на заготовку действует силовой фактор  $\xi$  (изгибающий момент или поперечная сила), приложенный в начале участка с номером  $n_P$  (см. рис. 1). Необходимо определить, какое влияние  $\xi$  оказывает на деформацию в конце участка с номером n.

Закон изгибающего момента  $M_{Z(Y)}(x)$  в пределах участка с номером n от силового фактора  $\zeta$ , приложенного в начале участка с номером  $n_P$ , выразим следующей зависимостью:

$$M_{Z(Y)}(x) \begin{vmatrix} l_n \\ m_{Z(Y)}(\xi, n_P, n), \\ 0 \end{vmatrix} (2)$$

где  $l_n$  – длина участка с номером *n*, м.



Рис. 1. Схема для определения изгибающего момента от силовых факторов

Интегрирование выражения (1) в пределах от 0 до  $l_n$  даёт значение угла поворота в конце участка с номером n [13]:

$$\theta_{Z(Y)}(n) = \Delta_{3Z(Y)}(n)' = \int_{0}^{l_n} \frac{M_{Y(Z)}(x)}{EI_n} + \theta_{Z(Y)0n}, (3)$$

где  $\theta_{Z(Y)}(n)$  — угол поворота в конце *n*-го участка, рад;  $\theta_{Z(Y)0n}$  — угол поворота в начале *n*-го участка, рад.

Угол поворота в начале *n*-го участка определяется из условия целостности ступенчатого вала [13]:

$$\theta_{Z(Y)0n} = \theta_{Z(Y)}(n-1) \quad . \tag{4}$$

Исходя из вышеизложенного, угол поворота  $\theta_{Z(Y)}(\xi, n_P, n)$  в конце участка с номером *n* от силового фактора  $\xi$ , приложенного в начале участка с номером  $n_P$ :

$$\theta_{Z(Y)}(\xi, n_P, n) =$$

$$= \int_{0}^{l_n} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_P, n)}{EI_n} + \theta_{Z(Y)}(\xi, n_P, n-1). \quad (5)$$

После суммирования выражения начального угла поворота  $\theta_{Z(Y)}(\xi, n_P, n-1)$  от  $n_P$  до n-1

$$\theta_{Z(Y)}(\xi, n_P, n-1) =$$

$$= \sum_{i=n_P}^{n-1} \int_{0}^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_P, i)}{EI_i} + \theta_{Z(Y)01}.$$
 (6)

С учётом (5) выражение (6) принимает следующий вид:

$$\theta_{Z(Y)}(\xi, n_P, n) =$$

$$= \sum_{i=n_P}^{n} \int_{0}^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_P, i)}{EI_i} + \theta_{Z(Y)01}, \quad (7)$$

где  $\theta_{Z(Y)01}$  – угол поворота в начале первого участка, рад.

Значение упругой деформации в конце участка с номером *n* можно получить интегрированием выражения (3) [13]:

$$\Delta_{3Z(Y)}(n) =$$

$$= \int_{0}^{l_{n}} \int \frac{M_{Y(Z)}(x)}{EI_{n}} + l_{n} \cdot \theta_{Z(Y)0n} + \Delta_{Z(Y)0n},$$
(8)

где  $\Delta_{3Y(Z)}(n)$  – значение упругой деформации в конце *n*-го участка, м;  $\Delta_{3Y(Z)0n}$  – значение упругой деформации в начале *n*-го участка, м.

Значение упругой деформации в начале *n*-го участка определяется из условия целостности ступенчатого вала [13]:

$$\Delta_{3Z(Y)0n} = \Delta_{3Z(Y)}(n-1). \tag{9}$$

Исходя из (2), (8), (9) значение упругой деформации  $\Delta_{Z(Y)}(\xi, n_P, n)$  в конце участка с номером *n* от силового фактора  $\xi$ , приложенного в начале участка с номером  $n_P$ , определяется зависимостью

$$\Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_P, n) =$$

$$= \int_{0}^{l_n} \int \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_P, n)}{EI_n} +$$

$$+ l_n \cdot \theta_{Z(Y)}(\xi, n_P, n-1) +$$

$$+ \Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_P, n-1). \quad (10)$$

После суммирования выражения упругой деформации  $\Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_P, n-1)$  от  $n_P$  до n-1

$$\Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_P, n-1) =$$

$$= \sum_{k=n_P}^{n-1} \int_{0}^{l_k} \int \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_P, i)}{EI_i} +$$

$$+ l_k \cdot \theta(\xi, n_P, k-1) + \Delta_{3Z(Y)01}, \quad (11)$$

где  $\Delta_{3Z(Y)01}$  – упругая деформация в начале первого участка (при  $n_P = 1$ ), м.

С учётом (7) выражение (11) принимает следующий вид:

$$\Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_P, n-1) =$$

$$= \sum_{k=n_P}^{n-1} \left[ \int_{0}^{l_k} \int \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_P, k)}{EI_k} + l_k \times \left( \sum_{i=n_P}^{k-1} \int_{0}^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_P, i)}{EI_i} + \theta_{Z(Y)01} \right) \right] + \Delta_{3Z(Y)01} \cdot (12)$$

С учётом (10) окончательно

$$\Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_P, n) =$$

$$= \sum_{k=n_P}^{n} \left[ \int_{0}^{l_k} \int \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_P, k)}{EI_k} + l_k \times \left( \sum_{i=n_P}^{k-1} \int_{0}^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_P, i)}{EI_i} + \theta_{Z(Y)01} \right) \right] + \Delta_{3Z(Y)01}.(13)$$

Таким образом, совместное влияние различных силовых факторов на деформацию заготовки сводится к определению функции, описывающей уравнение изгибающего момента в пределах рассматриваемого участка (14) и двух интегралов (15) и (16):

$$m_{Y(Z)}(\xi, n_P, n); \qquad (14)$$

$$\int_{0}^{l_{k}} \int \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_{P}, k)}{EI_{k}}; \qquad (15)$$

$$\int_{0}^{l_{i}} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_{P}, i)}{EI_{i}} \,. \tag{16}$$

Внешние силовые факторы, действующие на обрабатываемую заготовку, можно разделить на три группы. Первая – сосредоточенный изгибающий момент. В качестве примера может служить изгибающий момент, вызванный силой *P<sub>x</sub>*. Вторая — сосредоточенная поперечная сила (силы резания  $P_y$ ,  $P_z$ ). Третья — собственный вес детали, который необходимо учитывать при обработке длинных и нежёстких валов (в виде равномерно распределённой по каждой ступени, нагрузки).

Далее выражения (14)...(16) преобразовываются для каждой группы силовых факторов.

Для постоянного момента  $\xi = M$  (рис. 2) выражение (14) принимает вид:

$$m_{Y(Z)}^{M}(M_{Y(Z)}, n_{P}, n) = M_{Y(Z)}.$$
 (17)



Рис. 2. Закон изменения изгибающего момента при M = const

В (15) и (16) подставлено (17), получены следующие выражения:

$$\int_{0}^{l_{i}} \frac{m_{Y(Z)}^{M}(M_{Y(Z)}, n_{P}, i)}{EI_{i}} = \frac{M_{Y(Z)}l_{i}}{EI_{i}}; \quad (18)$$

$$\int_{0}^{l_{k}} \int \frac{m_{Y(Z)}^{M}(M_{Y(Z)}, n_{P}, k)}{EI_{k}} = \frac{M_{Y(Z)}l_{k}^{2}}{2 \cdot EI_{k}}; \quad (19)$$

В (13) подставлены (18) и (19), получена зависимость, выражающая влияние постоянного изгибающего момента на деформацию заготовки:

$$\Delta_{3Z(Y)}^{M}(M_{Y(Z)}, n_{P}, n) =$$

$$= \frac{M_{Y(Z)}}{E} \sum_{k=n_{P}}^{n} l_{k} \cdot \left[ \frac{l_{k}}{2I_{k}} + \sum_{i=n_{P}}^{k-1} \frac{l_{i}}{I_{i}} \right]. \quad (20)$$

Для поперечной силы ( $\xi = P$ ) (рис. 3) зависимость (14) принимает вид:

$$m_{Y(Z)}^{P}(P_{Z(Y)}, n_{P}, n) = P_{Z(Y)} \cdot \left(\sum_{j=n_{P}}^{n-1} l_{j} + x\right). (21)$$



Рис. 3. Закон изменения изгибающего момента от поперечной силы Р

Далее последовательно подставлены (21) в (15) и (16), (22) и (23) в (13), получена зависимость (24), выражающая влияние поперечной силы на деформацию заготовки:

$$\int_{0}^{l_{i}} \frac{m_{Y(Z)}(P_{Z(Y)}, n_{P}, i)}{EI_{i}} = \frac{P_{Z(Y)}l_{i}}{EI_{i}} \left(\sum_{j=n_{P}}^{i-1} l_{j} + \frac{l_{i}}{2}\right);(22)$$
$$\int_{0}^{l_{k}} \int \frac{m_{Y(Z)}(P_{Z(Y)}, n_{P}, k)}{EI_{k}} =$$
$$= \frac{P_{Z(Y)}l_{k}^{2}}{2 \cdot EI_{k}} \left(\sum_{j=n_{P}}^{k-1} l_{j} + \frac{l_{k}}{3}\right); \quad (23)$$

$$\Delta_{3Y(Z)}^{P}(P_{Y(Z)}, n_{P}, n) = \frac{P_{Y(Z)}}{E} \sum_{k=n_{P}}^{n} l_{k} \times \left[ \frac{l_{k}}{2I_{k}} \cdot \left( \sum_{j=n_{P}}^{k-1} l_{j} + \frac{l_{k}}{3} \right) + \sum_{i=n_{P}}^{k-1} \frac{l_{i}}{I_{i}} \cdot \left( \sum_{j=n_{P}}^{i-1} l_{j} + \frac{l_{i}}{2} \right) \right].$$
(24)

Собственный вес заготовки можно рассматривать как равномерно распределённую нагрузку по каждой ступени [13], приложенную от первого до последнего участка (рис. 4).



Рис. 4. Закон изменения изгибающего момента от собственного веса

Машиностроение

Поэтому зависимость (14) принимает вид:

$$m_{Z(Y)}^{q}(n) = \sum_{j=1}^{n-1} q_{j} l_{j} \left( \frac{l_{j}}{2} + \sum_{w=j+1}^{n-1} l_{w} + x \right) + \frac{q_{n} x^{2}}{2} .$$
(25)

Далее последовательно подставлены (25) в (15) и (16), (26) и (27) в (13), получена зависимость (28), выражающая влияние собственного веса заготовки на её деформацию:

$$\int_{0}^{l_{i}} \frac{m_{Z(Y)}^{q}(i)}{EI_{i}} = \frac{l_{i}}{EI_{i}} \left( \sum_{j=1}^{i-1} q_{j} l_{j} \times \left( \frac{l_{j}}{2} + \sum_{w=j+1}^{i-1} l_{w} + \frac{l_{i}}{2} \right) + \frac{q_{i} l_{i}^{2}}{6} \right); \quad (26)$$

$$\int_{0}^{l_k} \int \frac{m_{Z(Y)}^q(k)}{EI_k} = \frac{l_k^2}{2EI_k} \times$$

$$\times \left(\sum_{j=1}^{k-1} q_j l_j \left(\frac{l_j}{2} + \sum_{w=j+1}^{k-1} l_w + \frac{l_k}{3}\right) + \frac{q_k l_k^2}{12}\right); (27)$$

$$\Delta_{3}^{q}(n) = \sum_{k=1}^{n} l_{k} \left[ \frac{l_{k}}{2EI_{k}} \times \left( \sum_{j=1}^{k-1} q_{j} l_{j} \left( \frac{l_{j}}{2} + \sum_{w=j+1}^{k-1} l_{w} + \frac{l_{k}}{3} \right) + \frac{q_{k} l_{k}^{2}}{12} \right) + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{l_{i}}{EI_{i}} \left( \sum_{j=1}^{i-1} q_{j} l_{j} \left( \frac{l_{j}}{2} + \sum_{w=j+1}^{i-1} l_{w} + \frac{l_{i}}{2} \right) + \frac{q_{i} l_{i}^{2}}{6} \right) \right]. (28)$$

Таким образом, с учётом вышеизложенных зависимостей и преобразований уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\Delta(n)_{3Y(Z)} = \Delta_{3Y(Z)01} + \theta_{01Y(Z)} \sum_{i=1}^{n} l_i + \sum \Delta^M_{3Y(Z)}(M_{iZ(Y)}, n_{Pi}, n) + \sum \Delta^P_{3Y(Z)}(P_{iY(Z)}, n_{Pi}, n) + \Delta^q_3(n).$$
(29)

Это уравнение описывает значение упругой деформации в конце участка с номером *n*.

Влияние податливости шпиндельного узла  $\Delta_{UIY(Z)}$ , задней бабки  $\Delta_{FY(Z)}$ , инструмента  $\Delta_{UY(Z)}$ , а также смещения оси задней бабки  $\Delta_{CFY(Z)}$  и геометрических неточностей TCP на деформацию заготовки подробно рассмотрено в [14]. Эти факторы могут быть учтены посредством задания соответствующих начальных параметров в выражении (29).

На основе уравнения (29), методик структурно-параметрической оптимизации [15] и коррекции траектории движения режущего инструмента [16] разработана интегрированная система автоматизированного проектирования ступенчатых валов и управляющих программ ЧПУ, позволяющая управлять точностью токарной обработки на этапе технологической подготовки производства.

Для проверки адекватности и значимости математической модели (29) проводилась обработка партии валов на токарном станке модели 16К20Ф3, оснащенном системой ЧПУ NC-201 с последующим изменением на координатно-измерительной машине DuraMax. Исходные данные эксперимента: диаобрабатываемых ступеней метры  $D_1 = 20, D_2 = 25, D_3 = 30$  мм; длины обрабатываемых ступеней  $L_1 = L_2 = L_3 = 40$  мм; диаметр заготовки  $D_{3a2} = 38$  мм; длина заготовки  $L_3 = 240$  мм; предел прочности материала заготовки  $\sigma_B = 610$  МПа; модуль упругости материала заготовки  $E = 2.1 \cdot 10^{11} \, \Pi a.$ 

Параметры инструмента: материал режущей пластины – T15K6; передний угол  $\gamma = 0^{\circ}$ ; главный угол в плане  $\varphi = 90^{\circ}$ ; радиус при вершине r = 2 мм.

Результаты измерений приведены на рис. 5. В табл. 1 представлены сравнительные данные измерения погрешности профиля продольного сечения ступеней вала.

Применение интегрированной системы автоматизированного проектирования ступенчатых валов и программ

токарной обработки, основанных на управлении траекторией формообразующих элементов, позволило повысить точность обработки деталей в условиях эксперимента на 20...40 %. Данная сис-

тема может быть использована на промышленных предприятиях для прогнозирования и обеспечения точности изготовления ступенчатых валов.



Рис. 5. Погрешности профиля продольного сечения ступеней вала: а-в – построенные на основе формулы (29); г-е – построенные на основе измерений после обработки без коррекции траектории движения режущего инструмента; ж-и – построенные на основе измерений после обработки с коррекцией траектории движения режущего инструмента

Табл. 1. Результаты измерения

	Погрешность профиля продольного сечения					
диаметр, мм	Наименование	без коррекции, мкм	с коррекцией, мкм			
20	Конусность	100,4	61,2			
25		57,1	41			
30		41	32,5			

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жолобов, А. А. К вопросу технологического обеспечения качества поверхностей деталей при их формировании / А. А. Жолобов, С. В. Гонорова, В. А. Широченко // Отделочноупрочняющая технология в машиностроении : сб. тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 1994. – Ч. 1. – С. 67–69.

2. Жолобов, А. А. Прогнозирование и контроль возможностей технологической системы СПИД / А. А. Жолобов // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. – Полоцк : Технопринт ; Полоцкий гос. ун-т, 2001. – С. 78–79.

3. Жолобов, А. А. Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления : монография / А. А. Жолобов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 304 с. : ил.

4. Будкевич, А. М. Автоматизация прогнозирования деформации технологической системы при точении / А. М. Будкевич, К. А. Шалыжин ; науч. рук. А. А. Жолобов, канд. техн. наук, доц. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Респ. науч.-техн. конф., Могилев, 29 янв. 2004 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – С. 22.

5. **Пашкевич, В. М.** Повышение точности механической обработки и сборки изделий машиностроительного производства на основе построения и использования компьютерных обучающихся систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / В. М. Пашкевич ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2007. – 45 с.

6. Пашкевич, В. М. Самообучающиеся системы искусственного интеллекта в машиностроении / В. М. Пашкевич, Ж. А. Мрочек. – Могилев : МГТУ, 2003. – 434 с.

7. Жолобов, А. А. К вопросу прогнозирования и контроля геометрической точности технологических систем / А. А. Жолобов // Перспективные технологии, материалы и системы : сб. науч. тр. – Могилев : МГТУ, 2001. – С. 23.

8. Жолобов, А. А. Математическая модель для прогнозирования деформации заготовки при точении / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Машиностроение : сб. науч. тр. – Минск : Технопринт, 2003. – № 19. – С. 310–314.

9. Жолобов, А. А. Прогнозирование точности деталей при обработке на токарных станках / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 1. – С. 43–46.

10. Жолобов, А. А. Автоматизация процесса прогнозирования качества поверхностей деталей / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Вестн. МГТУ. – 2002. – № 2. – С. 11–14.

11. **Жолобов, А. А.** Методика контроля геометрической точности технологического оборудования и деталей / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2004. – С. 160–161.

12. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование шероховатости поверхности при точении / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск : Технопринт, 2002. – № 18. – С. 23–25.

13. **Писаренко, Г. С.** Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наук, думка, 1988. – 736 с.

14. Жолобов, А. А. Особенности расчёта упругих деформаций технологической системы при токарной обработке ступенчатого вала / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 3. – С. 87–95.

15. **Казаков, А. В.** Оптимизация режимов резания технологических переходов наружной токарной обработки ступенчатых валов на станке с ЧПУ / А. В. Казаков, А. А. Жолобов // Вестн. Белорус.-Рос. унта. – 2012. – № 4. – С. 23–31.

16. Жолобов, А. А. Коррекция траектории движения режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. – 2009. – № 9 (серия С). – С. 124–133.

Статья сдана в редакцию 17 января 2014 года

**Александр Алексеевич Жолобов**, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-23-04-51.

Алексей Владимирович Казаков, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-23-04-51.

Aleksandr Alekseyevich Zholobov, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-23-04-51.

Aleksei Vladimirovich Kazakov, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-23-04-51.

## УДК 621.9.048

М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. В. Москаленко, П. С. Богдан

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКИ ИСХОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОЛОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ВЕЛИЧИНУ СИЛ РЕЗАНИЯ В ПРОЦЕССЕ РАСПИЛИВАНИЯ ИМ МАТЕРИАЛОВ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АБРАЗИВНОЙ СУСПЕНЗИИ

## UDC 621.9.048

## M. G. Kiselyov, A. V. Drozdov, A. V. Moskalenko, P. S. Bogdan

## THE INFLUENCE OF MODES OF CONTACT-INITIATED MACHINING OF THE INITIAL SURFACE OF A WIRE TOOL UPON ITS CUTTING CAPACITY IN THE PROCESS OF MATERIALS CUTTING WITHOUT ABRASIVE SLURRY

#### Аннотация

Рассматриваются результаты экспериментальной оценки влияния режимов электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента на величину сил резания в процессе распиливания им различных материалов, таких как дерево, органическое стекло, углеситалл, без использования абразивной суспензии. Приведено описание методики проведения экспериментальных исследований и проанализированы результаты, отражающие зависимость величины сил резания от напряжения накопительного конденсатора при обработке и времени распиливания.

### Ключевые слова:

инструмент, заготовка, образец, проволока, лунка, абразивная суспензия, сила резания, электро-контактная обработка.

#### Abstract

The paper deals with the experimental estimation of the influence of modes of contact-initiated machining of the initial surface of a wire tool upon cutting forces exerted by it when cutting different materials such as wood, organic glass, and carbositall without using any abrasive slurry. The procedure of the experimental research is described and the results obtained are analyzed which reflect the dependence of the cutting capacity on the voltage of a reservoir capacitor during the process of machining and on the time of cutting.

#### Key words:

wire tool, nonprofiled tool, wire cutting, contact-initiated machining, cutting capacity, resistive-strain sensor, dynamogram.

## Введение

Непрофилированный инструмент, представляющий собой тонкую диаметром 0,2...0,3 мм стальную или вольфрамовую проволоку, широко применяется в различных процессах обработки материалов, в частности, в качестве электрода-инструмента при электроэрозионном и электрохимическом отрезании, вырезании заготовок из труднообрабатываемых металлов и сплавов [1], при многопроволочной механической резке слитков полупроводниковых материалов на пластины с подачей в зону обработки абразивной суспензии [2].

Во всех этих случаях используется проволока в исходном (после волочения) состоянии ее поверхности, которая не обладает режущей способностью, а съем материала заготовки осуществляется за счет электрической эрозии,

© Киселев М. Г., Дроздов А. В., Москаленко А. В., Богдан П. С., 2014

анодного растворения или механического воздействия на него абразивных частиц. Вместе с тем, если придать исходной поверхности проволоки режущую способность, то с помощью такого инструмента становится возможным обрабатывать материалы, твердость которых ниже твердости проволоки.

Авторами [3, 4] предложено осуществлять модификацию исходной поверхности проволочного инструмента путем ее электроконтактной обработки, которая является разновидностью электроэрозионной. В ходе ее выполнения в результате электрической эрозии на поверхности проволоки образуются лунки, имеющие по краям характерные наплывы застывшего металла, выходящие за исходный диаметр проволоки, которые и придают проволочному инструменту режущую способность. Важным является то, что размерами и формой получаемых наплывов (режущих элементов) и, соответственно, респособностью инструмента жущей можно эффективно управлять за счет изменения режимов и условий электроконтактной обработки исходной поверхности проволоки. Результатами экспериментальных исследований [4] доказано, что такой инструмент позволяет достаточно эффективно распиливать заготовки из материалов, твердость которых ниже твердости стальной (У8А) проволоки, в частности, из дерева, кости, органического стекла и углеситалла.

Для комплексного изучения процесса распиливания указанных материалов рассматриваемым инструментом важно располагать данными, отражающими влияние режимов электроконтактной обработки его исходной поверхности на величину сил сопротивления, действующих в зоне обработки, т. к. их величина и характер изменения в процессе распиливания позволяют судить о режущей способности проволочного инструмента и ее снижении за время обработки различных материалов. Экспериментальному определению таких зависимостей по-священы исследования авторов.

## Методика проведения экспериментальных исследований

Для выполнения операции разрезания образцов испытуемым проволочным инструментом была создана соответствующая установка, конструктивное исполнение и фотография общего вида которой показаны на рис. 1. Обработка осуществляется при относительном возвратно-поступательном движении проволочного инструмента и поверхности образца.

На массивном основании 1 установлены два кронштейна 2 и 13, в которых горизонтально и параллельно друг другу закреплены два стальных цилиндрических стержня 3, выполняющих роль направляющих скольжения. На них установлена каретка 4, которой от электродвигателя РД-09 (на рисунке не показан) посредством кривошипно-шатунного механизма 14 сообщается возвратнопоступательное движение вдоль горизонтальной оси. На каретке смонтирован рабочий стол 5 с помощью направляющих качения, благодаря которым он имеет возможность перемещаться вдоль горизонтальной оси с минимальным трением. Обрабатываемый образец 11 с помощью зажимных приспособлений закрепляется на рабочем столе.

Каретка 7 имеет возможность свободно перемещаться в вертикальном направлении по вертикально установленным направляющим скольжения 6 и 10. На ней устанавливается П-образная рамка 8, в которой в натянутом состоянии закрепляется испытуемая проволока 9. Минимальное усилие ее прижатия к поверхности обрабатываемого образца соответствует суммарному весу каретки 7 и рамки 8. Создание большего значения этого усилия обеспечивается путем установки на каретку 7 дополнительных грузов.



Рис. 1. Конструктивное исполнение установки для выполнения операции распиливания образцов испытуемым проволочным инструментом (а) и фотография ее общего вида (б)

Между собой каретка 4 и рабочий стол 5 связаны посредством упругой балки равного сопротивления 12 с наклеенными на ней по полумостовой схеме тензодатчиками. Ее применение позволило измерять величину сил сопротивления, действующих в зоне распиливания. Сигнал с тензодатчиков, пропорциональный величине сил сопротивления, поступает на усилитель постоянного тока и далее на самописец ЭНДИМ 622.01, где фиксируется на бумажном носителе. Тарировка тензобалки осуществляется путем ее нагружения с помощью электронного динамометра WeiHengWH-A05 с ценой деления 0,05 H.

Запись сил сопротивления производилась в начале обработки, т. е. на стадии врезания проволочного инструмента в поверхность образца, а также по истечении 5 и 10 мин его распиливания. Пример записи изменения Fc за время двойного хода образца приведен на рис. 2 с указанием максимального значения силы сопротивления Fc<sub>max</sub>, действующей в зоне распиливания.



Рис. 2. Фотография полученной записи измерения Fc

Так как величина сил сопротивления, действующих в зоне распиливания, представляет собой сумму сил резания Fp и сил трения Fтp, для их разделения использовалась следующая методика. Вначале осуществлялась обработка образца проволочным инструментом с модифицированной поверхностью с фиксированием значения Fcmax. По истечении принятого времени обработки он заменялся на проволочный инструмент в исходном состоянии его поверхности, который устанавливался в пропил на образце, и фиксировалось значение максимальной силы трения Fтр<sub>max</sub>, действующей между ними в процессе их относительного возвратно-поступательного движения. По полученным значениям Fc<sub>max</sub> и Fтр<sub>max</sub> вычислялась максимальная величина сил резания Fpmax, действующих в процессе распиливания образца ( $Fp_{max} = Fc_{max} - FTp_{max}$ ).

В качестве инструмента использовалась стальная (У8А) закаленная проволока диаметром 0,37 мм. Электроконтактная обработка ее поверхности осуществлялась с помощью стального проволочного электрода-инструмента диаметром 0,78 мм при различных значениях напряжения накопительного конденсатора. Подробное описание методики выполнения этой операции приведено в [5]. Образцы, имеющие одинаковую толщину распиливаемой поверхности (10 мм), изготавливались из дерева (высушенная сосна), органического стекла и углеситалла. Во всех экспериментах статическое усилие прижатия инструмента к поверхности образца было постоянным и составляло 10 Н

## Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

На рис. 3 приведены экспериментально полученные зависимости максимального значения силы резания, действующей в зоне распиливания, от продолжительности выполнения операции при обработке образцов из различных материалов испытуемым проволочным инструментом, исходная поверхность которого подвергнута электроконтактной обработке при трех значениях напряжения накопительного конденсатора U.

Из анализа таких зависимостей следует, что во всех случаях с увеличением напряжения накопительного конденсатора U в ходе электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента значение сил резания, действующих в зоне обработки, возрастает. Объясняется это тем, что с повышением U увеличивается энергия электрического разряда [6, 7], в результате чего возрастают как размеры получаемых на ней лунок, так и образовавшихся по их краям наплывов металла. Так, при U = 36 В средняя высота h этих наплывов составляет 4 мкм, при U = 46 Bh = 6 мкм и при U = 75 В h = 18 мкм. Так как именно эти наплывы металла на поверхности проволочного инструмента выполняют роль своеобразных режущих элементов, с увеличением их размеров возрастает глубина резания, а соответственно, и значение сил резания, действующих в зоне распиливания. В начале распиливания наибольшее значение силы резания (Fp = 0.04 H) отмечается при обработке образца из углеситалла, несколько меньшее (Fp = 0,035 H) из органического стекла и минимальное (Fp = 0.025 H) из дерева. В то же время действующие в зоне обработки силы трения имеют наибольшую величину (Fтр = 0,015 H) при распиливании органического стекла, меньшую (FTp = 0.010 H) – дерева, минимальную (Fтр = 0,005 H) углеситалла.



Рис. 3. Зависимость максимального значения силы резания Fp<sub>max</sub>, действующей в зоне распиливания, от продолжительности выполнения операции t при обработке образцов испытуемым проволочным инструментом, исходная поверхность которого подвергнута электроконтактной обработке при трех значениях напряжения накопительного конденсатора U: а – образец из дерева; б – образец из углеситалла; в – образец из органического стекла

С повышением продолжительности распиливания до 5 мин, т. е. с увеличением глубины пропила на образце, значение сил сопротивления Fc, действующих в зоне обработки, а также сил трения Fтр во всех случаях возрастает. Это связано с изменениями условий взаимодействия поверхностей проволочного инструмента и обрабатываемого образца, в частности, с увеличением площади их контактирования, вызывающего повышение сил трения. Вместе с тем, значение сил резания Fp на указанном временном интервале обработки остается постоянным, что свидетельствует о практически неизменной режущей способности проволочного инструмента.

При дальнейшем увеличении продолжительности распиливания образцов до 10 мин силы сопротивления Fc, действующие в зоне обработки, возрастают, и тем интенсивнее, чем меньше напряжение накопительного конденсатора при электроконтатной обработке исходной поверхности проволочного инструмента. Силы трения Fтр на этом временном участке обработки остаются постоянными, в результате чего силы резания по мере увеличения t возрастают. Наличие такой зависимости Fp(t) объясняется снижением режущей способности модифицированной поверхности проволочного инструмента за счет изнашивания и затупления режущих кромок образовавшихся на ней наплывов металла, что сопровождается возрастанием сил резания. Кроме того, в силу падения режущей способности инструмента ухудшаются условия удаления из зоны распиливания продуктов обработки, которые представляют собой мелкодисперсные частицы материала образца. Они пакетируются на поверхности инструмента, т. е. закрепляются на ней в зонах, прилегающих к наплывам металла (режущим элементам), вызывая тем самым дополнительное снижение режущей способности инструмента.

## Выводы

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая определить силы сопротивления, силы трения и силы резания, действующих в зоне обработки, в процессе распиливания образцов из различных материалов проволочным инструментом с модифицированной исходной поверхностью за счет ее электроконтактной обработки.

2. Установлено, что с увеличением напряжения накопительного конденсатора емкостью 300 мкФ с 36 до 75 В в ходе выполнения электроконтактной обработки исходной поверхности стальной (У8А) закаленной проволоки диаметром 0,36 мм значение сил резания Fp, действующих в начале распиливания образцов из различных материалов, во всех случаях возрастает. При этом наибольшее значение силы резания (Fp = 0.04 H) имеет место при распиливании образца из углеситалла, меньшее (Fp = 0.035 H) при обработке образца из органического стекла и минимальное (Fp = 0,030 H) при распиливании деревянного образца. Действующие в зоне обработки силы трения имеют наибольшую величину (Fтр = 0,015 H) при распиливании органического стекла, меньшую (Fтр = 0,010 Н) при обработке дерева и минимальную (Fтр = 0,005 H) при распиливании углеситалла.

3. Установлено, что с повышением продолжительности распиливания до 5 мин, т. е. с увеличением глубины пропила на образце, силы сопротивления Fc и силы трения Fтр, действующие в зоне обработки, во всех случаях возрастают, а силы резания Fp на указанном временном промежутке обработки остаются постоянными, что свидетельствует о неизменной режущей способности проволочного инструмента.

4. Установлено, что при дальнейшем увеличении продолжительности распиливания образцов t, до t = 10 мин, силы сопротивления Fc, действующие в зоне обработки, возрастают, и тем интенсивнее, чем меньше значение напряжения накопительного конденсатора при электроконтактной обработке исходной поверхности проволочного инструмента. При этом силы трения Fтр на этом временном промежутке обработки остаются постоянными, а силы резания Fp по мере увеличения t возрастают.

5. На основании обобщенного анализа результатов дано объяснение установленным зависимостям. В частности, показано, что при электроконтактной обработке исходной поверхности проволочного инструмента на ней образуются лунки, имеющие по краям наплывы металла, выполняющие роль своеобразных режущих элементов. При этом средняя высота этих наплывов возрастает с увеличением напряжения накопительного конденсатора U в ходе выполнения электроконтактной обработки исходной поверхности проволочного инструмента. Поэтому с повышением U увеличивается высота получаемых на поверхности проволочного инструмента

режущих элементов, а соответственно, и глубина резания в процессе распиливания образцов, что сопровождается возрастанием сил резания, действующих в зоне обработки.

Показано, что с увеличением продолжительности распиливания, т. е. глубины пропила на образце, в результате затупления режущих кромок на поверхности наплывов металла за счет их неизбежного изнашивания происходит снижение режущей способности инструмента, что сопровождается возрастанием сил сопротивления, действующих в зоне обработки. В свою очередь, падение режущей способности инструмента ухудшает условия удаления из зоны распиливания продуктов обработки, представляющих собой мелкодисперсные частицы материала образца, которые, пакетируясь на поверхности инструмента, т. е. закрепляясь на ней в зонах, прилегающих к наплывам металла (режущим элементам), вызывают тем самым дополнительное снижение режущей способности инструмента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Артамонов, Б. А.** Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов : учеб. пособие в 2 т. Т. 1. Обработка материалов с применением инструмента / Б. А. Артамонов, Ю. С. Волков, В. И. Дрожалова ; под ред. В. П. Смоленцева. – М. : Высш. шк., 1983. – 247 с. : ил.

2. **Пичугин, И. Г.** Технология полупроводниковых приборов : учеб. пособие для вузов по специальности «Полупроводники и диэлектрики», «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» / И. Г. Пичугин, Ю. М. Таиров. – М. : Высш. шк., 1984. – 288 с.

3. Модификация исходной поверхности проволочного инструмента с целью придания ей режущей способности путем применения электроконтактной обработки / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 1. – С. 13–22.

4. Влияние режимов электроконтактной обработки поверхности на ее режущую способность, износостойкость и прочность на разрыв / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 2. – С. 55–62.

5. Методика и оборудование для оценки режущей способности проволочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2012. – № 1. – С. 23–25.

6. **Мицкевич, М. К.** Электроэрозионная обработка металлов / М. К. Мицкевич, А. И. Бушик, И. А. Бакуто ; под ред. И. Г. Некрашевича. – Минск : Наука и техника, 1988. – 216 с.

7. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочного инструмента / М. Г. Киселев [и др.] // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 3–10.

Статья сдана в редакцию 31 декабря 2013 года

**Михаил Григорьевич Киселев**, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. Тел.: 8-029-756-64-05.

Алексей Владимирович Дроздов, канд. техн. наук, доц., Белорусский национальный технический университет. E-mail: dav7@tut.by.

**Андрей Валерьевич Москаленко,** начальник лаборатории, УП «Завод Электронмаш». E-mail: andrei.by@tut.by.

**Павел Сергеевич Богдан,** студент, Белорусский национальный технический университет. E-mail: bpc@mail.ru.

Mikhail Grigoryevich Kiselyov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. Phone: 8-029-756-64-05.

Aleksei Vladimirovich Drozdov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian National Technical University. E-mail: dav7@tut.by.

Andrei Valeryevich Moskalenko, Head of the laboratory, UP «Elektonmash» Plant. E-mail: andrei.by@tut.by. Pavel Sergeyevich Bogdan, student, Belarusian National Technical University. E-mail: bpc@mail.ru.

## УДК 621.791.763.2

А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ КОЛЬЦЕВОГО СПОСОБА ПОДАЧИ ЗАЩИТНОГО ГАЗА В ЗОНУ ГОРЕНИЯ ДУГИ ПРИ СВАРКЕ

## UDC 621.791.763.2

## A. O. Koroteyev, V. P. Kulikov, M. A. Kadrov

## PECULIARITIES OF USING THE CIRCULAR TECHNIQUE TO SUPPLY SHIELDING GAS TO THE ZONE OF ARC COMBUSTION IN WELDING

#### Аннотация

Проведены экспериментальные исследования с целью изучения особенностей замены сплошного потока защитного газа на кольцевой. Разработаны рекомендации по его оптимальному расходу, обеспечивающему отсутствие пористости в шве, достоверность которых подтверждена механическими испытаниями сварных соединений.

#### Ключевые слова:

газовые смеси на основе аргона, комбинированная защита, кольцевой поток защитного газа, методика оценки качества газовой защиты, конструктивные параметры сопла сварочной горелки.

#### Abstract

The experimental studies have been performed with the purpose of investigating peculiarities of the replacement of a continuous flow of the shielding gas by a circular one. Based on the studies performed, the recommendations for optimal gas consumption ensuring the absence of porosity in the weld have been worked out. The reliability of the recommendations received is confirmed by the mechanical testing of welded joints.

#### Key words:

argon-based gas mixtures, combined protection, circular flow of shielding gas, method of estimating the quality of gas protection, design parameters of the welding torch nozzle.

Дуговая сварка в защитных газах является наиболее распространенным способом сварки на предприятиях Республики Беларусь. В зарубежной практике широко применяется смесь Ar + CO<sub>2</sub>, которая имеет ряд преимуществ по сравнению со сваркой в чистом СО<sub>2</sub>. В первую очередь это небольшое разбрызгивание электродного металла и более высокие показатели механических характеристик сварного шва. В отечественной промышленности переход от углекислого газа на смеси идет медленно, что связано с высокой стоимостью аргона. Поэтому исследования, направленные на снижение расхода аргона при сварке в смесях, актуальны [1].

Одним из наиболее перспективных направлений снижения расхода аргона является использование комбинированных способов газовой защиты, когда смесь Ar + CO<sub>2</sub> (или чистый аргон) подаётся по центральному каналу горелки (рис. 1). Смесь активно участвует в физико-металлургических процессах, происходящих в капле электродного металла и сварочной ванне, что обеспечивает преимущества по сравнению со сваркой в CO<sub>2</sub>, названные выше. Функцию же вытеснения воздуха берет на себя чистый углекислый газ CO<sub>2</sub>, подаваемый коаксиально смеси (или чистому арго-

© Коротеев А. О., Куликов В. П., Кадров М. А., 2014

ну) по кольцевому каналу горелки. В этом случае расход аргона может быть снижен без ухудшения процесса сварки и механических свойств металла.

В литературе очень мало сведений по такой комбинированной защите, что требует проведения исследований по оптимизации параметров горелки, определению расхода защитного газа, оцен-



Рис. 1. Схема процесса сварки в условиях комбинированной газовой защиты [1–3]: 1 – электродная проволока; 2 – сопло, формирующее внутренний поток газа (Ar или Ar + CO<sub>2</sub>); 3 – сопло, формирующее наружный кольцевой поток газа (CO<sub>2</sub>), выполняющий защитную функцию

Принципиальная схема и основные геометрические параметры сопла, конструкция которого предполагает кольцевую подачу защитного газа в зону сварки, представлены на рис. 2. Основными геометрическими параметрами являются наружный диаметр кольцевого отверстия D, внутренний диаметр d и ширина канала b. В данном конструктивном исполнении вылет электродной проволоки L<sub>3</sub> будет совпадать с расстоянием от среза сопла до поверхности изделия.

Для реализации кольцевого способа подачи защитного газа в зону сварки был изготовлен комплект цилиндрических сменных распределительных втулок-обтекателей различного диаметра ке разбрызгивания металла и др.

Первым этапом этих исследований была оптимизация параметров внешнего кольцевого потока защитного газа CO<sub>2</sub> и определение условий, при которых качество защиты расплавленного металла не ухудшается по сравнению со сплошным потоком газа.



Рис. 2. Основные геометрические параметры кольцевого сопла: 1 – внутренняя полость кольцевого потока; 2 – поток защитного газа; D – наружный диаметр кольцевого канала; b – ширина кольцевого канала; L9 – вылет электродной проволоки

(12...20 мм), устанавливающихся на то-коподводящий наконечник (рис. 3).

Применение таких втулок позволило реализовать сплошной кольцевой поток газа и оперативно изменять его ширину путём изменения диаметра втулки, не меняя при этом конструкцию всего сопла. Втулки выполнены из меди либо латуни и благодаря своей теплопроводности легко очищаются в случае забрызгивания каплями электродного металла. Следует отметить, что кольцевой поток при таком способе подачи является сплошным, в отличие от вариантов подачи газа через ряд отверстий [8]. Это исключает возможность появления завихрений и подсоса воздуха в струю газа на выходе из сопла.

Важным вопросом является выбор соответствующей методики оценки качества газовой защиты. В то же время большинство из них основано на исследовании характера истечения потока защитного газа путём его окрашивания (например, парами машинного масла, дымом,  $TiO_2$  и др.) либо с помощью оптических устройств (интерферометрический метод, теневой метод) в условиях отсутствия горения сварочной дуги. При этом выбирается оптимальный вариант конструкции проточной части сопла с точки зрения ламинарности газового потока на выходе из горелки и стабильного характера его истечения [4, 9–11]. Как правило, далее эксперименты в условиях горения дуги проводятся уже для выбранной конструкции сопла.

В реальных условиях сварки существует два основных фактора, препятствующих использованию данных методик. Во-первых, это температура сварочной дуги, способствующая изменению физических свойств компонентов защитной газовой атмосферы и диссоциации многоатомных газов с изменением общего объёма и температуры получающейся в итоге защитной газовой смеси.



Рис. 3. Схема реализации кольцевой подачи защитного газа в зону сварки: а – традиционный вариант сварки с омывающим потоком защитного газа; б – сварка в условиях кольцевой подачи защитного газа; 1 – сопло сварочной горелки; 2 – поток защитного газа (CO<sub>2</sub>); 3 – электродная проволока; 4 – токоподводящий наконечник; 5 – втулка для распределения газового потока

Во-вторых, из переплавляемого дугой металла в процессе сварки выделяется большое количество газов и паров. Их удельный объём зависит от значения параметров режима сварки и состава электродной проволоки (при сварке проволоками 1,6...3 мм их количество может достигать 5...8 л/мин, что сопоставимо с расходом защитного газа [12]). Очевидно, что эти газы будут существенно искажать картину формирования фронта струи защитного газа.

Таким образом, выбранная с помощью данных методик конструкция сопла не может являться гарантировано оптимальной в реальных условиях сварки.

Для определения качества газовой защиты использовалась методика, предложенная А. В. Сурковым, сущность которой заключается в определении содержания δ-феррита в металле аустенитно-ферритного шва, которое хорошо коррелируется с содержанием азота и может определяться переносными ферритометрами контактного типа непосредственно на шве [13, 14]. Азот, попадая из атмосферы в зону горения дуги, поглощается расплавленным электродным металлом на стадии капли и сварочной ванной, в результате чего оказывает существенное влияние на структуру и фазовый состав закристаллизовавшегося шва на сталях типа 18-8. Будучи сильным аустенизатором (в 30 раз сильнее Ni [15]), он снижает содержание первичного δFe, что в условиях стабильного сохранения параметров режима сварки может являться критерием оценки качества газовой защиты как способности препятствовать проникновению атмосферных газов в зону горения дуги.

Для реализации данной методики были проведены эксперименты по наплавке валиков на пластины. Наплавка осуществлялась в автоматическом режиме проволокой Lincoln Electric ER 308LSi диаметром 1,2 мм (аналог проволоки Св-04Х19Н9). Значения параметров режима представлены в табл. 1. В качестве основного металла использовалась сталь 12Х18Н10Т, характеризующаяся большой растворимостью азота. Расход углекислого газа изменялся от 1,5 до 14 л/мин.

Результаты измерения ферритной фазы на образцах, полученных с использованием сопел с различной шириной и внутренним диаметром кольцевого газового канала, представлены на рис. 4 в виде графиков.

Табл. 1. Значения параметров	в режима наплавки
------------------------------	-------------------

Параметры	Единица измерения	Значение	
Сила сварочного тока І <sub>св</sub>	А	200	
Напряжение на дуге $U_{a}$	В	26	
Вылет электродной проволоки L <sub>э</sub>	ММ	12	
Скорость наплавки V <sub>н</sub>	м/ч	25	



b = 5,5 мм

Рис. 4. Содержание ферритной фазы  $\delta Fe$  в аустенитно-ферритном сварном шве при сварке в условиях кольцевой подачи защитного газа (CO<sub>2</sub>) с использованием сопел с различной шириной b и внутренним диаметром d газового канала

В процессе проведения эксперимента наблюдалось стабильное горение сварочной дуги с незначительным разбрызгиванием. Кольцевой поток газа удерживал пары и газы металла, при этом отчётливо был виден характерный столб газа более темного цвета (бесцветный защитный газ очерчивал его границы).

Выравнивание значений содержания ферритной фазы ( $\delta Fe \approx 1.9 \%$ ) по мере увеличения расхода защитного газа на представленных графиках свидетельствует о стабилизации процесса и снижении количества азота, попадающего из атмосферы в зону горения дуги, до минимальных в данных условиях значений.

Анализ полученных результатов показал, что уменьшение диаметра газораспределительной втулки обтекателя снижает минимальный необходимый расход защитного газа (например, для случая с шириной кольцевого канала 1,5 мм уменьшение диаметра d до 12 мм приводит к тому, что стабильный уровень значений ферритной фазы достигается при расходе защитного газа 4,6 л/мин, в отличие от 9,7 л/мин для втулки диаметром 20 мм). Это можно объяснить тем, что часть газового потока при столкновении с преградой в виде

поверхности свариваемых пластин направлена во внутреннюю полость (см. рис. 2). Фактически атмосфера зоны горения дуги содержит в себе некоторое количество защитного газа. Это хорошо заметно в случае эксперимента с подачей по кольцевому каналу вместо защитного газа воздуха. При этом в отсутствии дополнительных технических решений (например, в виде использования защитных газовых колпаков) не удаётся обеспечить получение плотных швов при сварке. Диаметр распределительной втулки определяет объём внутреннего пространства потока и, следовательно, при одинаковом количестве паров и газов, выделяющихся из расплавленного металла, для создания такого же давления необходимо большее количество подмешиваемого из кольцевого потока углекислого газа.

Комплексный анализ, учитывающий изменение обоих параметров (диаметра внутренней втулки d и ширины кольцевого канала b), показал, что они практически равнозначны. Для каждого из их сочетаний определены минимальные значения расхода защитного газа (табл. 2, рис. 5), при котором обеспечивается надёжная защита зоны сварки и расплавленного металла от взаимодействия с атмосферными газами.

Ширина кольцевого канала	Минимальный расход защитного газа Q <sub>min</sub> , л/мин, при внутреннем диаметре кольцевого канала d, мм					
b, мм	12	14	16	18	20	
< 2	4,6	5,5	6,5	8,0	9,7	
От 2 до 3	4,2	4,8	5,5	6,7	8,0	
От 3 до 4	3,8	4,2	4,7	5,5	6,5	
От 4 до 5	3,8	4,0	4,3	4,7	5,4	
Более 5	3,8	3,8	4,1	4,5	5,0	

Табл. 2. Рекомендации по минимальному расходу защитного газа в зависимости от внутреннего диаметра и ширины кольцевого канала



Рис. 5. Минимальный расход защитного газа  $Q_{min}$  в зависимости от внутреннего диаметра d и ширины b газового канала сопла при его кольцевой подаче в зону сварки

Для подтверждения полученных результатов в условиях сварки стыковых соединений из низкоуглеродистых сталей с зазором были проведены механические испытания на излом с целью определения минимального расхода защитного газа, при котором ещё не возникают поры в шве. Сварка осуществлялась с расходами газа от 2 до 15 л/мин (рис. 6).

Следует обратить внимание на необходимость увеличения времени предварительной продувки защитным газом. В момент зажигания дуги внутренняя область внутри кольцевого потока не должна быть заполнена атмосферным воздухом. В противном случае существует большая вероятность появления пористости на начальном участке шва. Как правило, это 8...10 мм шва при скорости сварки 25 м/ч.

Результаты механических испытаний образцов хорошо согласуются с предложенными рекомендациями. При сварке с меньшими, относительно рекомендуемых по диаграмме (см. рис. 5), расходами защитного газа наблюдается сплошная пористость в шве (см. рис. 6, г...е). Причём в некоторых случаях поры не выходят на поверхность, что затрудняет их выявление без проведения механических испытаний образцов.



Рис. 6. Поверхности излома сварных образцов вдоль шва: а-в – сварка с рекомендуемым расходом защитного газа; г-е – сварка с расходом защитного газа меньше минимального значения

## Заключение

Оптимальные расходы защитного газа при его кольцевой подаче в зону горения дуги позволяют обеспечить защиту зоны сварки не хуже, чем при использовании сплошного омывающего потока газа.

На основании установленных зависимостей разработана конструкция сопла, обеспечивающая независимую коаксиальную подачу двух газов в зону горения дуги: внутреннего потока аргона или смесей на его основе и кольцевого защитного потока углекислого газа. Данные о минимальном расходе, обеспечивающем защиту зоны горения дуги, позволили в дальнейшем вести оптимизацию расходов компонентов комбинированной газовой защиты преимущественно по расходу внутреннего потока.

Снижение расхода центрального потока защитного газа, состоящего из аргона или смесей на его основе, открывает возможности его существенной экономии при сохранении высоких показателей механических характеристик сварных соединений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Куликов, В. П.** Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / В. П. Куликов. – Минск : Экоперспектива, 2003. – 415 с. : ил.

2. Сварка малоуглеродистых сталей плавящимся электродом при комбинированной защите / В. С. Лаевский [и др.] // Сварочное производство. – 1969. – № 10. – С. 21–22.

3. Грибовский, Г. Влияние двухслойного кольцевого потока защитных газов на процесс сварки плавящимся электродом / Г. Грибовский, Б. Кравчук, В. А. Ленивкин // Сварочное производство. – 1996. – № 4. – С. 6–8.

4. **Римский, С. Т.** Особенности истечения двух газовых потоков из сопел сварочных горелок при автоматической сварке плавящимся электродом / С. Т. Римский // Автоматическая сварка. – 2007. – № 2. – С. 37–43.

5. Виноградов, В. С. Особенности истечения защитного газа из горелок с кольцевыми соплами / В. С. Виноградов, В. К. Колесников, М. В. Кузнецов // Сварочное производство. – 1977. – № 7. – С. 30–32.

6. Виноградов, В. С. Перенос электродного металла при сварке в кольцевом потоке углекислого газа / В. С. Виноградов, В. К. Колесников, М. В. Кузнецов // Сварочное производство. – 1978. – № 9. – С. 26–28.

7. **Коротеев, А. О.** Дуговая сварка в условиях кольцевого потока защитного газа / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – Ч. 1. – С. 176–177.

8. Применение двухструйных сопловых устройств для сварки в среде защитных газов / В. Т. Федько [и др.] // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – № 3. – С. 12–18.

9. Дубова, Т. Н. Окраска защитного газа при сварке / Т. Н. Дубова // Сварочное производство. – 1963. – № 2. – С. 40–41.

10. Влияние формы сопла и характера истечения защитного газового потока на качество защиты сварного шва / В. В. Степанов [и др.] // Сварочное производство. – 1977. – № 6. – С. 34–36.

11. Исследование защитных газовых потоков в сварочных горелках с применением голографической интерферометрии / Б. С. Касаткин [и др.] // Автоматическая сварка. – 1980. – № 2. – С. 15–18.

12. **Иваненко, В. М.** К вопросу о количестве газов, выделяющихся при сварке из электродной проволоки / В. М. Иваненко, Н. М. Будник // Сварочное производство. – 1964. – № 9. – С. 9–11.

13. **Новожилов, Н. М.** Основы металлургии дуговой сварки в газах / Н. М. Новожилов. – М. : Машиностроение, 1979. – 232 с. : ил.

14. Ускоренный способ исследования сварочных процессов / Н. М. Новожилов [и др.] // Сварочное производство. – 1976. – № 3. – С. 48.

15. Медовар, Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей / Б. И. Медовар. – М. : Машиностроение, 1966. – 432 с. : ил.

#### Статья сдана в редакцию 14 января 2014 года

**Артур Олегович Коротеев,** аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-27-37-43. **Валерий Петрович Куликов,** д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-27-37-43.

Михаил Андреевич Кадров, студент, Белорусско-Российский университет.

Artur Olegovich Koroteyev, PhD student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-27-37-43. Valery Petrovich Kulikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-27-37-43. Mikhail Andreyevich Kadrov, student, Belarusian-Russian University.

## УДК 621.833.16

## А. М. Пашкевич

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЛАНЕТАРНЫХ РАДИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНЫХ ШАРИКОВЫХ РЕДУКТОРОВ

## UDC 621.833.16

### A. M. Pashkevich

## THE PROCEDURE OF THE CALCULATION OF PLANETARY RADIAL-PLUNGER BALL REDUCERS

#### Аннотация

Разработана новая методика инженерного расчета радиально-плунжерных шариковых редукторов, позволяющая определить все радиальные и осевые размеры редукторов, избавиться от подрезания центрального колеса и, следовательно, повысить нагрузочную способность передачи. Профиль центрального колеса после аппроксимации простейшими линиями был описан математическими зависимостями, которые легли в основу новой методики.

#### Ключевые слова:

автоматизированный выбор параметров, шар, сепаратор, эксцентрик, центральное колесо, крышка подшипниковая, ступень редуктора, модульный принцип построения, присоединительные фланцы, база данных.

#### Abstract

A new procedure of the engineering calculation of radial-plunger ball reducers has been developed, which determines all radial and axial dimensions of reducers. The technique used allows avoiding the undercutting of the central wheel and therefore increases the load capacity of the transmission. The profile of the central wheel after approximation with the simplest lines has been described by mathematical dependencies, which form the basis of the new procedure.

## Key words:

retainer, eccentric, bearing cap, pass of gearing, automated selection of parameters, ball, cage, eccentric, central wheel, bearing cap, gear stage, modular design, connecting flanges, database.

Планетарные радиально-плунжерные редукторы во многих случаях могут эффективно применяться вместо традиционных планетарных зубчатых, т. к. отличаются пониженными массогабаритными параметрами и способностью выдерживать перегрузки.

В агропромышленном секторе Республики Беларусь, на птицефабриках, широко используются ленточные транспортеры, приводы которых оснащены планетарными зубчатыми редукторами с передаточным отношением U = 120. При перегрузках, особенно в зимний период, зубчатые редукторы часто выходят из строя, имея наработку 3...5 месяцев.

Для одной из птицефабрик (Романовичи, Могилевский р-н) разработан двухступенчатый радиально-плунжерный редуктор с передаточным отношением U = 121. Эксплуатационные характеристики такого редуктора достаточно высоки, поэтому по заказу данного предприятия на Могилевском ОАО «Техноприбор» была изготовлена партия из 120 редукторов.

Чертеж редуктора в разрезе

© Пашкевич А. М., 2014

представлен на рис. 1 (цифрами обозначены основные детали). Габаритные размеры редуктора невелики и выгодно отличаются от размеров стандартных планетарных зубчатых редукторов: длина 272 мм (включая вылет ведомого вала 80 мм), диаметры фланцев 200 мм, диаметр собственно редуктора 140 мм.



Рис. 1. Конструкция радиально-плунжерного редуктора для U = 121

При вращении ведущего вала 1 закрепленные на нем при помощи шпонок эксцентрики 2 и установленные на них подшипники (такие же, как подшипники 11) перемещают плунжеры 14 в радиальных отверстиях сепараторов 3 и 7. При этом плунжеры 14 поочередно утапливаются во впадины зубчатых профилей центральных колес 4. Каждая ступень редуктора выполнена двухрядной, т. е. в каждой ступени расположено по два ряда шаровых плунжеров 14. Их количество в каждом ряду равно 11, а количество зубьев каждого центрального колеса 4 равно 10. Следовательно, каждая из ступеней редуктора обеспечивает передаточное отношение U = 11, а выходной вал редуктора вращается с частотой, которая соответствует передаточному отношению U = 121.

Фланец 5 служит для присоединения электродвигателя, а фланец 9 – для закрепления редуктора на раме ленточного транспортера. На конце выходного вала редуктора закрепляется звездочка, передающая вращение на два параллельно установленных транспортера.

В обеих ступенях редуктора применены одинаковые шаровые плунжеры диаметром 15 мм. Общее количество плунжеров в двух ступенях редуктора равно 44.

Редукторы, подобные представленному на рис. 1, могут применяться в других приводах машин и технологического оборудования, отличаясь лишь способом крепления.

В двух- и трехступенчатых редукторах наиболее нагруженной является последняя ступень. Однако выполнение ступеней с одинаковыми плунжерами, эксцентриками, подшипниками на эксцентриках и кольцами на подшипниках (если они предусмотрены в конструкции редуктора с большими радиальными размерами) позволяет при техническом обслуживании редуктора компенсировать износ деталей зацепления в наиболее нагруженной ступени. Этого можно добиться, если поменять местами более изношенные и менее изношенные детали.

В этом случае при проектировании редуктора расчет следует вести по его наиболее нагруженной ступени. Ниже приводится порядок такого расчета.

Вначале ведется выбор исходных данных для расчета. При проектировании исходными данными являются следующие:

 частота вращения ведущего вала (приводного электродвигателя) n<sub>1</sub>;

– частота вращения ведомого вала  $n_2$  или передаточное отношение редуктора U (передаточное отношение U редуктора равно количеству шаровых плунжеров в одном планетарном ряду  $U=n=z_2+1$ , следовательно,  $z_2=U-1$ );

– общее количество шаровых плунжеров в двух планетарных рядах, соответствующее соотношению  $2n = 2(z_2 + 1)$ ;

– величина h (КПД редуктора), зависящая от передаточного отношения, которая, как показали эксперименты [1–3], должна приниматься на стадии расчета и проектирования в пределах 0,8...0,85 для передаточных отношений от 4 до 50, 0,7...0,75 – для передаточных отношений от 60 до 100 и 0,3...0,5 – для передаточных отношений от 100 до 1000;

 вращающий момент *M*<sub>3</sub> на ведомом валу редуктора;

 момент и мощность на ведущем валу редуктора

$$M_{1} = M_{3} / (\eta U);$$
$$P_{1} = M_{1} \omega_{1} = \frac{M_{1} \pi n_{1}}{30},$$

где  $\omega_1$  – угловая скорость вращения ведущего вала;

– момент *M*<sub>2</sub> на заторможенном валу редуктора

$$M_2 = M_1 (\eta u + 1);$$

– контактные напряжения в материале для изготовления центрального колеса и сепаратора редуктора. Чаще всего центральные колеса и сепараторы редуктора изготавляют из стали 40Х и подвергают закалке с низким отпуском, поэтому при пределе текучести  $\sigma_T = 786 \text{ M}\Pi \text{a} [\sigma_H] = 2.8, \sigma_T = 2.8 \cdot 786 = 2200 \text{ M}\Pi \text{a} = 2200 \cdot 10^6 \Pi \text{a} [1-3];$ 

– базы данных для автоматизированного выбора размеров шариковых подшипников, которые включают формулы для определения диаметров наружных колец и ширины подшипников как функции их внутреннего диаметра.
 Эти формулы получены на основе аппроксимации размеров подшипников наиболее подходящими зависимостями:

– особолегкая серия подшипников (для *D* от 10 до 100 мм):

Наружный диаметр подшипников  $D_{\mu\alpha\rho} = 1,386 D + 12,528$ . При этом достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,9987$ .

Ширина подшипников  $B = -0,0006 D^2 + 0,236 D + 6,1882$ , причем  $R^2 = 0.9819$ .

В этих и ниже приведенных зависимостях *D* – внутренний диаметр подшипника;

– легкая серия подшипников (для *D* от 15 до 100 мм):

$$D_{\mu a p} = 1,6297 D + 12,135, \quad R^2 = 0,997.$$
  
 $B = 0,00005 D^3 - 0,0074 D^2 +$ 

$$+0,5626D+4,5382,$$

 $R^2 = 0,9979.$ 

– средняя серия подшипников (для *D* от 10 до 100 мм):

$$D_{\mu a p} = 1,9825 \ D + 11,924 \,,$$

$$R^2 = 0,9991.$$
  
 $B = 0,4D + 7, \quad R^2 = 1.$ 

По выбранным исходным данным ведется расчет диаметральных размеров деталей редуктора.

Конструктивная схема редуктора второго класса, содержащая две одинаковые ступени, аналогична конструкции на рис. 1.

Расчетная схема редуктора первого класса (один модуль (или одна ступень) редуктора второго класса) приведена на рис. 2, где показаны все диаметральные размеры деталей одной ступени редуктора (или диаметральные размеры одноступенчатого редуктора). При проектировании многоступенчатых редукторов обычно учитывают следующее: редукторы выполняются одноступенчатыми при передаточном отношении до 50; двухступенчатыми – при передаточных отношениях от 50 до 256; трехступенчатыми – для передаточных отношений от 256 до 4096.

Расчет ведется в следующем порядке:

— выбирают типоразмер электродвигателя и диаметр  $D_{\mathcal{P}\mathcal{I}}$  его вала, используя табл. 1;

 принимают электродвигатель с ближайшей наибольшей мощностью;

– выбирают первоначальное (принятое) значение диаметра  $D_{IIIII}$  шарового плунжера, учитывая передаваемую мощность и передаточное отношение редуктора:

а) при мощности до 0,5 кВт и передаточном отношении редуктора до 50 следует принимать  $D_{IIIII} = 8...10$  мм;

б) при мощности до 2 кВт и передаточном отношении редуктора (ступени редуктора) до 20 следует принимать  $D_{IIIII} = 10...12$  мм;

в) при мощности до 5 кВт и передаточном отношении редуктора (ступени редуктора) до 10 следует принимать  $D_{IIIII} = 12...15$  мм.

Табл. 1. Диаметры валов электродвигателей  $D_{\mathcal{H}}$  в зависимости от их мощности  $P_{\mathcal{H}}$ 

Рэд	ММ	0,06	0,12	0,25	0,55	1,1	2,2	3,0	5,5	7,5	11
Дэд	кВт	7	9	11	14	19	22	24	28	32	38

Рекомендуемые значения шаровых плунжеров обеспечивают наименьшие диаметральные размеры редуктора;

– определяют по принятому значению диаметра  $D_{IIIII}$  диаметр ведущего эксцентрика  $D_{BЭ}$  (наружного диаметра подшипника, установленного на эксцентриковом участке ведущего вала, или наружного диаметра кольца, установленного на подшипнике) по формуле

$$D_{B\mathcal{P}} = 0,6366 D_{IIIII} (n - 2,3563),$$

выбирают ближайшее его значение из ряда диаметров наружных колец подшипников, используя приведенные выше соотношения для  $D_{hap}$  подшипников.

Если  $D_{B,9}$  больше 160 мм, то принимают рассчитанное значение  $D_{B,9}$ , округляя его до ближайшего целого значения, кратного 5 (это значение наружного диаметра кольца, напрессованного на подшипник).

Если  $D_{BЭ}$  меньше 160, то установку кольца на подшипник не предусматривают;

 определяют средний диаметр профиля центрального колеса по соотношению

$$D_{CP} = D_{B\mathcal{P}} + 2 D_{III};$$

 – рассчитывают α<sub>2max</sub> в соответствии с формулой

$$\alpha_{2\max} = \arctan \frac{n+1}{\sqrt{1,621(n-2,3563)^2 - 1}};$$





Рис. 2. Расчетная схема редуктора
– находят наибольшую нормальную силу, действующую на один плунжер  $\overline{F}_{2N\max}$ , по формуле

$$\overline{F}_{2N\max} = 1,562 M_2 / (n R_{2cp} \sin \alpha_{2\max}),$$

в которую подставляют  $R_{2CP} = D_{CP} / 2;$ 

– рассчитывают после определения  $\overline{F}_{2N\max}$  и выбора  $[\sigma_H]$  требуемый диаметр плунжеров  $D_{IIIP}$  и полученную величину округляют до ближайшего большего значения с шагом 0,1 мм:

$$D_{IIIP} = 0,9665 \cdot 10^{11} \sqrt{\frac{2 \ \overline{F}_{2N \max}}{[\sigma_H]^3}}$$

В эту формулу при вычислениях следует подставлять значения  $\overline{F}_{2N \max}$  в ньютонах,  $[\sigma_H]$  в паскалях, тогда расчетные значения диаметра шарика  $D_{IIIP}$  получаются в метрах;

– принимают новое значение  $D_{IIIII} = \frac{D_{IIIIP} + D_{IIIII}}{2}$ , если  $D_{IIIIP} > D_{IIIIII}$  или  $D_{IIIP} < D_{IIIIII}$ , и методом последовательных приближений расчет повторяют до тех пор, пока  $D_{IIIP}$  не совпадет с  $D_{IIIIII}$  с точностью до 1...2 %;

– определяют по окончательно найденному  $D_{IIIP}$  диаметр ведущего эксцентрика  $D_{BЭ}$  и средний диаметр  $D_{CP}$  зубчатого профиля центрального колеса;

– приравнивают диаметр  $D_1$  конца ведущего вала редуктора диаметру  $D_{\mathcal{I}\mathcal{I}}$ вала электродвигателя, т. е. принимают  $D_1 = D_{\mathcal{I}\mathcal{I}}$ ;

– подбирают диаметр  $D_{11}$  ступени ведущего вала редуктора под правый подшипник по соотношению  $D_{11} = D_1 + (2...5)$ , полученное значение округляют до ближайшей большей величины, кратной 5;

– подбирают по значению  $D_{11}$ подшипник средней серии и устанавливают его наружный диаметр  $D_{15}$  и ширину  $B_{15}$ ;

– определяют по величине  $D_{15}$  диаметр правой крышки  $D_{16}$  по форму-

ле  $D_{16} = D_{15} + (8...10);$ 

– принимают  $D_{13} = D_{11}$ , а также  $D_{22} = D_{15}$  и ширину  $B_{22} = B_{15}$ ;

– определяют диаметр ведомого вала  $D_{23}$  по формуле  $D_{23} = D_{22} + (8...10)$ , полученное значение округляют до ближайшей большей величины, кратной 5 (под правый шариковый подшипник ведомого вала);

– подбирают по значению  $D_{23}$  правый подшипник ведомого вала (целесообразно средней серии) и указывают наружный диаметр этого подшипника  $D_{26} = 1,9825$   $D_{23} + 11,924$  и его ширину  $B_{26} = 0,4$   $D_{23} + 7;$ 

- устанавливают диаметр  $D_{27}$  левой крышки по формуле  $D_{27} = D_{26} + (8...10);$ 

— определяют диаметр конца ведомого вала  $D_2$  по значению момента  $M_3$  в соответствии с формулой

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{M_3}{0,2[\tau_\kappa]}},$$

где  $[\tau_{\kappa}]$  – среднее значение допускаемых напряжений при кручении стальных валов,  $[\tau_{\kappa}] = 147...181$  МПа;

$$M_3 = M_1 \eta U \; .$$

Полученное значение  $D_2$  корректируют до ближайшего большего из стандартного ряда чисел. Если же окажется, что  $D_2 \le D_1$ , то следует принять  $D_2 = D_1$ ;

– устанавливают по диаметру  $D_2$ значение  $D_{21}$ , используя формулу  $D_{21} = D_2 + (4...6)$ , полученное значение округляют до ближайшей большей величины, кратной 5 (под левый подшипник ведомого вала);

– подбирают по значению  $D_{21}$  левый подшипник ведомого вала (целесообразно из средней серии подшипников) и из таблицы размеров выбирают (или вычисляют) его наружный диаметр и ширину;

– определяют диаметр  $D_{25}$  левой крышки подшипника по соотношению  $D_{25} = D_{24} + (8...10);$ 

– устанавливают эксцентриситет по формуле  $e = D_{III} / 4;$ 

– определяют диаметр  $D_{12}$  средней ступени ведущего вала редуктора (под эксцентрики) по соотношению  $D_{12} = D_{11} + (3...5);$ 

– рассчитывают наружный диаметр эксцентрикового участка ведущего вала по зависимости  $D_{14} = D_{12} + 2e + (5...15)$ , полученное значение округляют до величины, кратной 5 (под шариковый подшипник, устанавливаемый на эксцентрике);

 подбирают шарикоподшипник (легкой или средней серии) для эксцентрика по диаметру D<sub>14</sub>, используя соответствующие таблицы.

Полученная величина  $D_{17}$  – это диаметр ведущего эксцентрика ( $D_{17} = D_{B3}$ ); если ранее был определен диаметр ведущего эксцентрика  $D_{B3}$ , превышающий  $D_{17}$ , то требуемую величину  $D_{B3}$  можно получить, предусматривая установку с натягом кольца соответствующего размера на наружном кольце подшипника с диаметром  $D_{17}$ ;

- находят для выбранного под-

шипника средней серии диаметром  $D_{17}$ его ширину  $B_{17}$  по соотношению  $B_{17} = 0,4D_{17} + 7$ . Такую же ширину должно иметь кольцо, увеличивающее наружный диаметр  $D_{17}$  подшипника до его величины, равной  $D_{B3}$ ;

 устанавливают наибольший диаметр ведомого вала D<sub>19</sub> по соотношению

$$D_{19} = D_{B\mathcal{P}} + 1,5 D_{III};$$

– определяют диаметр ведомого вала  $D_{18}$  по формуле  $D_{18} = D_{B\mathcal{P}} + 0.5 D_{III}$ ;

– рассчитывают средний диаметр зубчатого венца центрального колеса по формуле  $D_{CP} = D_{19} + 0.5D_{UU}$ ;

– находят наибольший диаметр зубчатого венца центрального колеса по соотношению  $D_{\text{max}} = D_{19} + D_{III}$ ;

– устанавливают наибольший диаметр центрального колеса по формуле  $D_{28} = D_{\text{max}} + (15...20).$ 

Затем выбирают продольные размеры основных деталей редуктора.

*Расчет длин ведущего вала* (расчетная схема этого вала с обозначением длин ступеней представлена на рис. 3):



Рис. 3. Расчетная схема ведущего вала

– задают длину  $L_1$  первой правой ступени ведущего вала, например,  $L_1 = 2 D_1$ ;

– определяют длину  $L_{11}$  второй справа ступени ведущего вала  $L_{11} = 3 + L_{15} + B_{15}; L_{15} = 3$  (рис. 6);  $B_{15}$  – ширина

правого подшипника ведущего вала; тогда  $L_{11} = 6 + B_{15}$ ;

– устанавливают длину  $L_{12}$  средней ступени ведущего вала  $L_{12} = 14 + 2B_{17}$ , где  $B_{17}$  – ширина подшипника, установленного на эксцентрике;

– задают длину  $L_{13}$  левой ступени ведущего вала  $L_{13} = B_{22}$ , где  $B_{22} = B_{15}$  – ширина левого подшипника ведущего вала.

*Расчет ведомого вала-сепаратора* (расчетная схема этого вала представлена на рис. 4):

— определяют длину  $L_{19}$  первой правой ступени ведомого вала  $L_{19} = 16 + 2B_{17}$ ,

где *B*<sub>17</sub> – ширина подшипника, установленного на эксцентрике;

– устанавливают длину  $L_{23}$  второй справа ступени ведомого вала  $L_{23} = B_{26}$ , где  $B_{26} = 0,4D_{23} + 7$  – ширина правого подшипника ведомого вала;

– определяют длину  $L_{21}$  второй слева ступени ведомого вала  $L_{21} = 3 + 3 + B_{24} + 5$  или  $L_{21} = 11 + B_{24}$ , где  $B_{24}$  – ширина левого подшипника;

– задают длину  $L_2$  левой ступени ведомого вала, например,  $L_2 = 2D_2$ ;

- задают дополнительные длины ведомого вала  $L_{22} = 20; L_{18} = 5.$ 



Рис. 4. Расчетная схема ведомого вала-сепаратора

*Расчет левой крышки* (расчетная схема этой крышки представлена на рис. 5):

– определяют длину  $L_{25} = 8 + B_{24}$ , где  $B_{24}$  – ширина левого подшипника ведомого вала;

— рассчитывают длину  $L_{27} = 5 + B_{26}$ , где  $B_{26}$  — ширина правого подшипника ведомого вала;

- из конструктивных соображений задают длины, например,  $L_{24} = 3$ ;  $L_{26} = 5$ ;  $L_{281} = 10$ ;  $L_{29} = 5$ .

*Расчет правой крышки* (расчетная схема этой крышки представлена на рис. 6):

– определяют длину  $L_{16} = 6 + B_{15}$ , где  $B_{15}$  – ширина правого подшипника

ведущего вала;

— из конструктивных соображений задают длины, например,  $L_{15} = 3$ ;  $L_{282} = 5$ .

**Расчет центрального колеса** (расчетная схема центрального колеса представлена на рис. 7): определяют длину центрального колеса по соотношению  $L_{28} = 12 + 2B_{17}$ , где  $B_{17}$  – ширина подшипника, установленного на эксцентрике.

**Расчет** эксцентрика (расчетная схема эксцентрика представлена на рис. 8): устанавливают длину (ширину) эксцентрика  $L_{14} = B_{17}$ , где  $B_{17}$  – ширина подшипника, установленного на эксцентрике.



Рис. 5. Расчетная схема левой крышки

Рис. 6. Расчетная схема правой крышки



Рис. 7. Расчетная схема центрального колеса



Рис. 8. Расчетная схема эксцентрика

На основе расчетов и принятых конструктивных решений корректируется разработанная конструктивная схема планетарного радиально-плунжерного редуктора, ведутся необходимые проверочные расчеты и уточняются значения конструктивных параметров.

Расчет и проектирование многоступенчатых радиально-плунжерных редукторов не имеет существенных сложностей и почти не отличается от расчета и проектирования одноступенчатых редукторов. В этом случае целесообразно использовать модульный принцип построения редукторов, последовательно соединив одинаковые по конструкции ступени редуктора. Применение модульного принципа построения редукторов приводит к обеспечению высокой ремонтопригодности, т. к. позволяет после определенной наработки поменять местами детали зацеплений наиболее и наименее изношенных ступеней редуктора.

### Заключение

Изложена новая методика инженерного расчета радиально-плунжерных шариковых редукторов, отличающаяся использованием модульного принципа их построения и обеспечением их высокой ремонтопригодности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Планетарные кулачково-плунжерные передачи. Проектирование, контроль и диагностика / М. Ф. Пашкевич [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 221 с.

2. Кудрявцев, В. Н. Планетарные передачи / В. Н. Кудрявцев. – М. : Машиностроение, 1966. – 307 с.

3. Планетарные передачи : справочник / Под ред. В. Н. Кудрявцева и Ю. Н. Кирдяшева. – Л. : Машиностроение, 1977. – 536 с.

Статья сдана в редакцию 15 октября 2013 года

Александр Михайлович Пашкевич, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-25-08-08.

Aleksandr Mikhailovich Pashkevich, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-25-08-08.

## УДК 629.3

## С. А. Рынкевич, И. Ю. Хадкевич

# МЕТОДИКА СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

## UDC 629.3

## S. A. Rynkevich, I. Y. Khadkevich

# THE PROCEDURE OF ALGORITHMS SYNTHESIS FOR DIAGNOSING HYDRAULIC SYSTEMS OF MOBILE MACHINES

#### Аннотация

В статье приведена методика синтеза алгоритмов диагностирования гидравлических систем мобильных машин. Разработаны основные этапы построения этих алгоритмов. Даны основы оценки работоспособности мобильных машин и их механизмов. Приведены структурные блок-схемы алгоритмов диагностирования гидравлических систем и других механизмов мобильных машин. Представлены рекомендации по практическому использованию алгоритмов в автомобильной микроэлектронике.

## Ключевые слова:

алгоритм, диагностирование, гидравлическая система, мобильная машина.

#### Abstract

The paper gives the procedure of the synthesis of algorithms for diagnosing hydraulic systems of mobile machines. Basic stages of the construction of these algorithms have been developed. The fundamentals of the evaluation of the operating capacity of mobile machines and mechanisms are presented. Structural block diagrams of the algorithms for diagnosing hydraulic systems and other mechanisms of mobile machines are given. The paper presents recommendations for the practical use of the algorithms in automotive microelectronics.

### Key words:

algorithm, diagnosing, hydraulic system, mobile machine.

Сущность методики синтеза алгоритма диагностирования заключается в следующем. На начальном этапе на основе данных производится анализ диагностической информации, оцениваются значения диагностических параметров и их динамика. При этом проверяется общее техническое состояние гидравлической системы (ГС) и ее элементов. Исходя из анализа условий работоспособности выявляется, находятся ли значения диагностических параметров в допустимых пределах. Техническое состояние ГС может быть работоспособным или неработоспособным в соответствии с методикой, изложенной в [1].

© Рынкевич С. А., Хадкевич И. Ю., 2014

Продолжение проверки заключается в том, что для работоспособного состояния ГС проводится контроль запаса работоспособности и прогнозируется техническое состояние, выявляется остаточный ресурс [1]. В случае, если ГС окажется неработоспособным, проводится поиск и локализация неисправностей с выдачей технического диагноза. На информационной панели оператора выводится необходимое сообщение или заключение о техническом диагнозе (рис. 1).

Диагностирование ГС мобильных машин, оснащенных бортовой микроэлектроникой, как совокупность различных процедур может быть дифференцировано в зависимости от уровней, видов и характеров решаемых задач. Уровни создания систем активного диагностирования начинаются с простых комбинаций приборов контроля и информационных панелей до сложных интеллектуальных систем [2].

При диагностировании возможны различные действия по формированию диагноза (рис. 2).



Рис. 1. Алгоритм оценки технического состояния объекта



Рис. 2. Варианты схем постановки диагноза: КР – контроль работоспособности; ПИС – прогнозирование изменения состояния; ПД – поиск дефекта; КЗР – контроль запаса работоспособности; «+» – положительный результат КР; «–» – отрицательный результат КР

Синтез алгоритмов является заключительным этапом исследований и позволяет создать электронную систему активного диагностирования ГМП, основы построения которой на различных этапах развития технической диагностики заложены в [1]. Для построения алгоритмов диагностирования не существует жестких шаблонов. При этом учитываются требования и пожелания заказчиков и эксплуатирующих машину организаций.

Схема алгоритма способа интеллектуального диагностирования ГС и других механизмов мобильной машины представлена на рис. 3. Она содержит блоки инициализации запуска программы алгоритма, базы данных, фиксации и преобразования диагностических параметров, вычислительных операций, логических операций, операций диагностирования механизмов автомобиля, операций экспертной подсистемы, индикации и отображения информации.

Программа алгоритма реализуется посредством бортового электронного блока управления [1]. В блоке инициализации осуществляются операции организации циклического запуска программы на выполнение. При запуске программы на выполнение база данных загружается в оперативную память микропроцессора. В базе данных (блок 1) параметры характеристик хранятся управления механизмами автомобиля, параметры механизмов и параметры ограничений, используемые при реализации алгоритма диагностирования.

В каждом цикле отработки программы путем опроса датчиков осуществляется фиксация диагностических параметров (блок 2 алгоритма).

Для отображения состояния системы управления автомобилем на информационном табло используются следующие символы: **P** – стоянка автомобиля с работающим двигателем; **N** – нейтраль в коробке передач; **R** – передача реверса; **D** – движение на автоматическом режиме переключения передач; C – движение на командном режиме. Конфигурация и размеры символов должны соответствовать СТБ ИСО 2575-2001. Символ P должен быть красного цвета, а символы N, R, D и C – зеленого [1].

Информационное табло постоянно содержит информацию о номере включенной передачи, состоянии блокирования гидротрансформатора и др.

В качестве индикаторов главного информационного экрана в соответствии с ГОСТ ИСО 2575-2005 разработаны пиктограммы приборных панелей. Основные диагностические параметры отображаются на главной странице приборной панели.

Рассмотрим работу алгоритма диагностирования (см. рис. 3).

В каждом цикле осуществляется опрос датчиков, считывается информация о режиме работы автомобиля, состоянии его органов управления (блок 2), проверяется общее состояние функционирования механизмов и подсистем автомобиля (блок 3). Если все параметры находятся в допустимых пределах, то на дисплее (табло) выдается сообщение о полной исправности машины (блок 5).

В случае выхода значений некоторых параметров за допустимые пределы с привлечением базы знаний экспертной системы, которая может быть представлена, например, в декларативной или продукционной форме [2], осуществляется поиск механизма или подсистемы, в которых имеется неисправность (блок 6).

При этом индикатору локализации неисправностей *M* присваивается определенное значение от 1 до 9, в соответствии с которым диагностируется предположительно неисправный механизм. Если индикатору *M* присвоено несколько значений, то поиск неисправностей осуществляется одновременно по нескольким ветвям алгоритма.



Рис. 3. Алгоритм системы диагностирования

Рассмотрим работу системы активного диагностирования при возникновении неисправностей отдельного механизма.

Предположим, на основе анализа базы знаний ИСД выяснила, что предположительно неисправный механизм – система гидропривода автомобиля. При этом M = 6 (рис. 3, блок 17). Далее процесс диагностирования будет продолжаться по ветви алгоритма, начиная с блока 18 «Проверка состояния гидропривода» (рис. 4).

После анализа значений диагностических параметров в случае обнаружения их выхода за допустимые пределы осуществляется проверка состояния гидропривода ГМП. Если ответ на вопрос блока «Значения параметров в допустимых пределах?» отрицателен, производится проверка работоспособности гидропривода и определяется общее состояние гидросистем. Обнаружив неисправные элементы, система анализирует возникшие симптомы по их проявлениям. Одновременно информация адресуется ветви I алгоритма работы подсистемы нечеткой логики (рис. 5) и ветви ІІ базы знаний экспертной системы (рис. 6). С привлечением интеллектуальных методов распознавания и технологии экспертных систем распознаются типовые ситуации, выявляются неисправности и причины их возникновения.

Последовательно оценивается техническое состояние гидроаппаратов: насоса, распределителей, предохранительных клапанов, гидроцилиндров, фильтров и других элементов гидропривода (см. рис. 4).

По аналогичной схеме работает алгоритм диагностирования при возникновении любой другой неисправности того или иного механизма машины.

На рис. 5 показана ветвь I алгоритма работы подсистемы нечеткой логики. Обращение к этой ветви происходит каждый раз, когда диагностированию подлежит тот или иной элемент или механизм системы. На основе сформированной базы функций принадлежности, описывающей вектор диагностических параметров  $\vec{X}_D = (x_{D1}, ..., x_{Di})$ , а также продукционных правил нечеткой логики вида *Если*  $\tilde{A}_j$ , *то*  $\tilde{B}_j$  осуществляются процедуры фаззификации и дефаззификации, в результате чего выводится выходное решение. На его основе формируется предварительный технический диагноз  $\vec{D} = \{L(e_i, S_i), \vec{X}_D\}$  [1].

После поступления информации от ветви **II** алгоритма (см. рис. 6) и сравнения полученного диагноза с информацией экспертной системы принимается решение либо об установлении окончательного диагноза с выводом его на дисплей или печать, либо (в случае расхождения диагнозов) об уточнении базы данных нечеткой логики, коррекции продукционных правил, их весовых коэффициентов и характеристик функций принадлежности [2].

Ветвь алгоритма экспертной системы II (см. рис. 6) работает следующим образом. В базе данных экспертной системы содержится описание неисправностей и причин их возникновения, представленное, например, в матричном виде, а также информация о типовых отказах, их проявлениях и соответствующих им ситуациях.

При поступлении запроса от основной ветви алгоритма диагностирования осуществляется логический вывод по совокупности продукционных правил «Если ... то», и в соответствии с ним результат предварительного анализа причин технической неисправности передается требуемой ветви диагностирования соответствующего механизма (в рассматриваемом примере – ветви алгоритма диагностирования гидропривода). При необходимости информация экспертной системы может быть визуализирована на панели оператора или водителя.



Рис. 4. Алгоритм диагностирования гидропривода мобильной машины



Рис. 5. Алгоритм подсистемы диагностирования на основе метода нечеткой логики



Рис. 6. Алгоритм работы блока экспертной базы знаний

Для выявления и локализации неисправностей датчиков используются специализированные алгоритмы. Так, при неисправности любого из датчиков формируется сигнал  $\mathcal{Д}_v = 1$ , который отображается на информационном табло. По соответствующему запросу можно получить информацию о том, какой конкретно датчик неисправен. Если неисправен датчик частоты вращения выходного вала коробки передач  $n_{\rm BB}$ , формируются сигналы  $\mathcal{Д}_{nee} = 1$  и  $F_{\rm ast} = 0$ .

По первому сигналу прекращается выполнение алгоритма формирования сигналов автоматического управления переключением передач. По второму сигналу отключается автоматический режим управления, осуществляется переход на командное управление, и по сигналу  $\mathcal{A}_v = 1$  реализуется алгоритм программного управления фрикционами коробки передач.

Разработан алгоритм диагностирования ГМП с поэлементным анализом, который использован на ОАО БелАЗ [1].

Общая схема алгоритма диагностирования ГС и трансмиссии мобильной машины представлена на рис. 7.

Программа алгоритма средствами бортовой электронной системы реализуется следующим образом.

При инициализации осуществляоперации организации шикются лического запуска программы на выполнение. При запуске программы на выполнение база данных загружается в оперативную память микропроцессора. В базе данных хранятся параметры характеристик управления механизмами машины (двигателя, трансмиссии и др.), параметры гидропривода и элементов ГС, параметры ограничений и допустимых значений, используемые при реализации алгоритма диагностирования. В каждом цикле отработки программы путем опроса датчиков осуществляется фиксация диагностических параметров, а также поэлементная проверка исправности ГС.



Рис. 7. Алгоритм общего диагностирования ГМП

Для поиска отказов и локализации неисправностей используются специальные подпрограммы поэлементного поиска неисправностей (насоса, фильтров, распределителей и т. д.). Эти подпрограммы представлены отдельными алгоритмами, которые приведены ниже. При этом проверяются условия оценки работоспособности [1]. В случае выполнения одного из условий на индикаторной панели выдается соответствующее сообщение. Кроме того, данной неисправности присваивается определенный код. Например, при выполнении условия  $T_{\Gamma Д T} > T_{\Gamma Д T}$  тах выдается сообщение «Перегрев рабочей жидкости В ГДТ», при выполнении условия  $p_{\rm \tiny LT}-p_{\rm \varphi}>0,2$ МПа сообщение «ГС неисправна по причине засорения масляного фильтра в главной магистрали». Тип и форма выдаваемого сообщения о неисправности определяются возможностями индикаторной электронной панели.

Целесообразно также разрабатывать алгоритмы диагностирования и прогнозирования технического состояния основных элементов машины и ГС: насоса, гидрораспределителей, клапанов давления, фильтров. Эти алгоритмы должны быть основаны на учете получаемых в процессе научных исследований закономерностей изменения амплитуд пульсаций давления и расходов жидкости, КПД и ряда других диагностических параметров. При отклонении этих параметров от полученных предельно допустимых значений бортовая система выдаст управляющие сигналы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

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.

## Статья сдана в редакцию 10 января 2014 года

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

Ирина Юрьевна Хадкевич, аспирант, Белорусско-Российский университет.

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

Irina Yuryevna Khadkevich, PhD student, Belarusian-Russian University.

## УДК 629.3.064.3

# В. П. Тарасик, Н. Н. Горбатенко, В. С. Савицкий

# ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КЛАПАНОВ

## UDC 629.3.064.3

V. P. Tarasik, N. N. Gorbatenko, V. S. Savitsky

# INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF ELECTROHYDRAULIC PROPORTIONAL VALVES

#### Аннотация

Приведены типовые конструкции двухступенчатых электрогидравлических пропорциональных клапанов, применяемых в мехатронных системах автоматического управления. Проведен анализ влияния параметров шариковых клапанов на их рабочие характеристики. Изложены результаты экспериментальных исследований созданного авторами пропорционального клапана для карьерных самосвалов БелАЗ.

## Ключевые слова:

электрогидравлический пропорциональный клапан, шариковый пилотный клапан, гидромеханическая передача, фрикцион, мехатронная система автоматического управления.

#### Abstract

The paper presents the typical designs of two-stage electrohydraulic proportional valves used in mechatronic systems for automatic control of gear change in hydromechanical transmissions. Emphasis is placed on the analysis of physical properties of ball pilot valves with the evaluation of their advantages and disadvantages compared to slide valves. The influence of the parameters of ball valves on their performance is analyzed. The results of the experimental investigation of an electrohydraulic proportional valve for BelAZ quarry dump trucks developed by the authors are given.

#### Key words:

electrohydraulic proportional valve, ball pilot-operated valve, hydromechanical transmission, friction clutch, mechatronic system of automatic control, microprocessor controller, quarry dump truck.

В системах автоматического управления различными механизмами мобильных машин широкое применение получили электрогидравлические пропорциональные клапаны. Электрогидравлический пропорциональный клапан (ЭГПК) состоит из пропорционального электромагнита и гидравлического клапана. Пропорциональный электромагнит позволяет получить линейную зависимость между развиваемым им усилием  $F_{3,M}$  и величиной тока  $I_{3,M}$  в его обмотке. Управление током І<sub>э.м</sub> в мехаавтоматического тронных системах

управления осуществляется посредством широтно-импульсных модуляторов (ШИМ), встроенных в микропроцессорный контроллер системы управления. Значение  $I_{3.M}$  зависит от скважности выходного сигнала ШИМ.

Развиваемое усилие  $F_{3,M}$  электромагнита сравнительно невелико, обычно не превышает 30...40 Н, поэтому при необходимости получения значительного выходного сигнала ЭГПК гидравлические клапаны часто выполняют двухступенчатыми. В этом случае совокупность пропорционального электромаг-

© Тарасик В. П., Горбатенко Н. Н., Савицкий В. С., 2014

нита и первой ступени гидравлического клапана представляет собой регулятор давления, на выходе которого формируется гидравлический управляющий сигнал давления  $p_{y\Pi}$ , подаваемый на вход второй ступени. Регулятор давления обеспечивает линейную зависимость управляющего сигнала  $p_{y\Pi}$  от величины тока  $I_{2.M}$ .

Вторая ступень ЭГПК осуществляет усиление мощности поступающего на него сигнала  $p_{\rm VII}$ , формируя на его выходе более мощный сигнал выходного давления  $p_{\rm вых}$ , подаваемый на орган управления, и выполняет функции гидрораспределителя, соединяя выходной канал гидроклапана второй ступени либо с источником питания – гидронасосом, либо со сливом. Зависимость выходного сигнала *р*вых от тока І<sub>э.м</sub> также линейная, что дает возможность сравнительно просто создавать высокоэффективные алгоритмы управления механизмами мобильных машин. В частности, ЭГПК получили широкое применение в системах управления автоматическими трансмиссиями различных машин [1, 2, 4]. Первую ступень ЭГПК называют пилотным клапаном, а вторую регулятором-распределителем.

Существует множество конструкций ЭГПК, различающихся исполнением пилотного клапана и регуляторараспределителя. На рис. 1 и 2 показаны наиболее часто используемые конструктивные схемы. В качестве пилотного клапана используют золотниковый или шариковый гидроклапан.

На рис. 1 представлена конструкция регулятора давления с золотникопилотным клапаном вым модели МНDRE 02К фирмы «Бош Рэксрот» (Bosch Rexroth) ( $\Phi$ РГ), состоящего из пропорционального электромагнита 1 и золотникового клапана 2. На вход 5 регулятора давления подается рабочая жидкость из главной масляной магистрали под давлением *р*гл. Управляющий сигнал давления  $p_{\text{VII}}$  формируется клапаном в полости управления 4, связанной с входом регулятора-распределителя. При отсутствии управляющего сигнала на выходе ШИМ ток в обмотке электромагнита  $I_{2,M} = 0$ , поэтому  $F_{_{\rm Э.M}} = 0$ , а золотник занимает положение, показанное на рис. 1. При этом полость управления 4 через канал 3 и отверстие 7 соединена со сливом, входной канал 5 перекрыт и управляющее давление  $p_{vn}$  равно 0.



Рис. 1. Регулятор давления с золотниковым клапаном

При подаче тока в обмотку электромагнита на его якоре возникает усилие  $F_{3.M} = kI_{3.M}$ , перемещающее золотник вправо, перекрывая слив 7 и соединяя канал 5 подачи с полостью управления 4 через канал 3. Давление в полости управления определяется усилием  $F_{3.M}$ , развиваемым электромагнитом.

$$p_{\rm ym} = \frac{F_{\rm 9.M} - F_{\rm mp}}{A_{\rm p.A}},$$
 (1)

где  $p_{y\Pi}$  – управляющий сигнал регулятора давления, Па;  $F_{\Pi p}$  – усилие пружины регулятора давления, Н;  $A_{p.d}$  – площадь дросселирующего пояска золотника, м<sup>2</sup>.

В процессе регулирования давления  $p_{\rm уп}$  золотник 2 осуществляет осциллирующие движения в среднем положении, попеременно приоткрывая и прикрывая отверстия 5 и 7. Недостатком золотникового клапана является его склонность к засорению продуктами износа, находящимися в масле. На входе в золотниковый клапан устанавливается фильтр 6, однако он не в состоянии полностью исключить попадание твердых частиц в полости клапана.

Значительно менее чувствительны к засорению шариковые гидроклапаны. Рассмотрим конструктивные особенности ЭГПК с пилотным клапаном шарикового типа.

На рис. 2, *а* показана конструкция ЭГПК фирмы «Катэрпиллар» (Caterpillar) (США), используемого для автоматического управления переключением передач в гидромеханической трансмиссии, а на рис. 2,  $\delta$  – фирмы «Коматрол» (Comatrol) (Италия). Приведенные технические решения имеют практически одинаковое исполнение пилотных клапанов, но различаются конструкцией второй ступени.

Рассмотрим устройство пилотного клапана. Шариковый пилотный клапан состоит из шарикового затвора 4, седла

клапана 5 и отверстия 6, соединяющего клапан с полостью управления 7 регулятором-распределителем. Управление давлением  $p_{\rm VII}$  в этой полости осуществляет регулятор давления, в который входят пропорциональный электромагнит 1 и шариковый пилотный клапан. При подаче тока в обмотку электромагнита воздействие на шариковый затвор пилотного клапана с левой стороны оказывает усилие электромагнита, передаваемое через его якорь 2 и шток 3, а с правой стороны на него действует усилие давления жидкости в полости управления 7. Эта полость через дроссели 8 и 13 постоянно соединена с каналом 14 подвода рабочей жидкости из главной масляной магистрали под давлением  $p_{\Gamma \pi}$ .

В выключенном состоянии ЭГПК якорь электромагнита 2 и его шток 3 находятся в крайнем левом положении. Шарик 4 выкатывается влево до упора в шток 3 под действием потока жидкости, поступающей через открытое отверстие 6 и далее через отверстия 18 и 17 в сливной канал 16. Расход жидкости на слив в основном определяется диаметрами дросселей 8 и 13. В полости управления 7 при этом поддерживается некоторая величина давления, определяемая площадью дросселя, образуемого шариковым клапаном.

Для включения передачи в трансмиссии, управляемой ЭГПК, на обмотку электромагнита подается напряжение и реализуется характеристика изменения во времени величины тока в обмотке, управляемой посредством ШИМ, а следовательно, и усилия  $F_{3.M}$ , развиваемого электромагнитом. В результате происходит регулирование давления  $p_{y\Pi}$  в полости управления 7, а на его основе посредством регулятора-распределителя формируется выходное управляемое давление ЭГПК  $p_{вых}$  в выходном канале 15. Давление в полости управления  $p_{y\Pi}$  возрастает вследствие перемеще-



ния шарика вправо и уменьшения площади дросселя, образуемого между шариком 4 и его седлом 5.

Рис. 2. Конструкции ЭГПК с шариковыми пилотными клапанами

Давления в каналах ЭГПК связаны между собой системой уравнений

$$-\frac{A_{\text{дp2}}^{2}}{A_{\text{дp1}}^{2}}p_{\text{уп}} + \left(1 + \frac{A_{\text{дp2}}^{2}}{A_{\text{дp1}}^{2}}\right)p_{\text{к.д}} = p_{\text{гл}};$$

$$\frac{A_{\text{ш.к}}^{2}}{A_{\text{дp1}}^{2}}p_{\text{уп}} + p_{\text{к.д}} = p_{\text{гл}},$$
(2)

где  $p_{\Gamma \Lambda}$  – давление в главной масляной магистрали, Па;  $p_{\gamma \Pi}$  – давление в полости управления, Па;  $p_{K,\Lambda}$  – давление в канале дросселей 13 и 8, Па;  $A_{\Lambda p1}$  – площадь первого дросселя 13, м<sup>2</sup>;  $A_{\Lambda p2}$  –

площадь второго дросселя 8, м<sup>2</sup>;  $A_{\text{ш.к}}$  – площадь дросселя, образуемого шариковым клапаном, м<sup>2</sup>.

Площадь дросселя  $A_{\text{ш.к}}$  зависит от перемещения шарика h и определяется по формулам:

$$A_{\rm III.K} = \frac{\pi d_{\rm c}}{2} \left( 1 - \frac{d_{\rm III}^2}{4D^2(h)} \right) D(h); \quad (3)$$

$$D(h) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{d_{\rm III}^2 - d_{\rm c}^2}{4}} + h\right)^2 + \frac{d_{\rm c}^2}{4}}, \quad (4)$$

где  $d_{\rm c}$  – диаметр седла шарикового клапана, м;  $d_{\rm III}$  – диаметр шарика, м;

D(h) – функция перемещения шарика, м; *h* – перемещение шарика, м (*h* = 0 – при закрытом шариковом клапане; *h* > 0 – при открытом клапане).

Расход рабочей жидкости на слив через шариковый клапан вычисляется по формуле

$$Q_{\rm III.K} = CA_{\rm III.K} \sqrt{\frac{2p_{\rm yII}}{\rho}}, \qquad (5)$$

где  $Q_{\text{ш.к}}$  – расход рабочей жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости, кг/м<sup>3</sup>; C – коэффициент расхода дросселя.

Регулятор-распределитель (см. рис. 2, a и  $\delta$ ) представляет собой золотниковый дросселирующий гидроклапан. Основными его элементами являются золотник 10 и пружина 12. В золотнике выполнены дроссели 13 и 8 шарикового пилотного клапана и дроссель 11, через который осуществляется обратная связь регулятора-распределителя по выходному сигналу  $p_{\rm Bbix}$ . Кроме того, дроссель 11 обеспечивает демпфирование колебаний золотника.

В исходном состоянии ЭГПК, соответствующем обесточенному электромагниту, золотник 10 регуляторараспределителя находится в крайнем левом положении, соединяя отверстие 15 подачи рабочей жидкости в гидроцилиндр фрикциона с отверстием слива 16 (см. рис. 2, б). В процессе регулирования давления на выходе регуляторараспределителя  $p_{\rm BMX}$  кромки левого и правого поясков золотника должны находиться в режиме дросселирования, поддерживая получение заданной характеристики давления  $p_{\text{вых}} = f(t)$  в процессе буксования фрикциона. После замыкания фрикциона гидромеханической передачи, т. е. после завершения переключения передачи, золотник должен переместиться в крайнее правое положение, надежно соединив между собой канал подвода рабочей жидкости к ЭГПК 14 с каналом подачи в гидроцилиндр фрикциона 15 (см. рис. 2, *a*).

Регулятор-распределитель может выполняться с дифференциальным (см. рис. 2, а) или с линейным золотником (см. рис. 2, б). При управлении включесоответствующего фрикциона нием гидромеханической передачи дифференциальный золотник позволяет рационально использовать весь диапазон рабочего давления *р*<sub>гл</sub> главной магистрали, вплоть до номинального значения р<sub>гл.ном</sub>. В этом случае снижаются затраты мощности на привод масляных насосов. При использовании линейного золотника давление на выходе регулятора-распределителя будет ниже номинального, что потребует повышения номинальной величины давления р<sub>гл.ном</sub> в масляной магистрали гидромеханической передачи.

Из условия статического равновесия золотника регуляторараспределителя получаем следующее уравнение:

$$p_{\rm BMX} = \frac{A_{\rm y\Pi}}{A_{\rm \Pi p}} p_{\rm y\Pi} - \frac{F_{\rm \Pi p}}{A_{\rm \Pi p}}, \qquad (6)$$

где  $A_{y\Pi}$  – площадь торца золотника со стороны полости управления, м<sup>2</sup>;  $A_{\Pi p}$  – площадь торца золотника со стороны пружины, м<sup>2</sup>;  $F_{\Pi p}$  – усилие пружины регулятора-распределителя, Н.

У дифференциального золотника  $A_{y\Pi} > A_{\Pi p}$ , поэтому можно подобрать требуемое соотношение между давлениями  $p_{Bbix}$  и  $p_{y\Pi}$ . У линейного золотника  $A_{y\Pi} = A_{\Pi p}$ , а  $p_{Bbix}$  всегда меньше  $p_{y\Pi}$ . В результате золотник будет постоянно находиться в состоянии дросселирования канала управления 15 и канала слива 16. Поскольку золотниковый клапан регулятора-распределителя обычно выполняют с отрицательным перекрытием, он будет постоянно сливать некоторое количество жидкости,

снижая при этом главное давление  $p_{\Gamma\Pi}$ , что может создать проблему формирования необходимой характеристики управляющего давления  $p_{У\Pi}$  и эффективного управления выходным давлением  $p_{вых}$ . Отмеченные свойства линейного золотника являются недостатком такого ЭГПК.

Рассмотрим подробнее характеристики шарикового пилотного клапана. Определим вначале влияние диаметра шарика на параметры характеристик управления. Диаметр шарика  $d_{\rm III}$  должен быть согласован с диаметром седла клапана  $d_c$ . Выбор соотношений между ними рекомендуется осуществлять из условия получения необходимого угла наклона  $\alpha$  линии, проведенной через центр шарика и точку его контакта с седлом в закрытом состоянии клапана, относительно оси отверстия 6 (см. рис. 2, *a* и б). Рекомендуется принимать значение этого угла в пределах  $\alpha = 38...40$  град.

На рис. 3 представлены основные характеристики шарикового пилотного клапана при различных значениях диаметра шарика.



Рис. 3. Характеристики шарикового пилотного клапана при различных размерах шарикового затвора: 1 –  $d_{\rm III} = 3,969$  мм;  $d_{\rm c} = 2,5$  мм; 2 –  $d_{\rm III} = 4,763$  мм;  $d_{\rm c} = 3$  мм; 3 –  $d_{\rm III} = 6,350$  мм;  $d_{\rm c} = 4$  мм; 4 –  $d_{\rm III} = 7,938$  мм;  $d_{\rm c} = 5$  мм

Зависимость площади дросселя Ашк, образуемого шариковым клапаном, от перемещения шарика h показана на рис. 3, а. Для исследований характеристик шарикового пилотного клапана приняты четыре варианта его параметров. Во всех вариантах  $\alpha = 39$  град. В вариантах 1 и 2 при соответствующих значениях *h* наступает ограничение на увеличение площади проходного сечения шарикового клапана А<sub>ш.к</sub>, накладываемое диаметром отверстия седла клапана d<sub>c</sub>. Поэтому принималось условие  $A_{\text{III.K}} \leq A_{\text{c}}$ , где  $A_{\text{c}}$  – площадь отверстия седла клапана. При расчетах приняты одинаковые диаметры дросселей 13 и 8 (см. рис. 2, *а* и б) в канале подвода рабочей жидкости к шариковому клапану  $d_{np1} = d_{np2} = 1$  мм, номинальное значение давления в главной масляной магистрали  $p_{\Gamma \Pi. HOM} = 1,45$  МПа.

На рис. 3, б приведены графики зависимостей давления В полости управления  $p_{\rm VII}$  и давления в канале между дросселями  $p_{\kappa,\pi}$  от перемещения шарика h. С возрастанием h, что соответствует увеличению открытия шарикового клапана, значение  $p_{\rm VII}$  во всех рассматриваемых вариантах стремится к некоторому минимуму, близкому к нулю, а значение  $p_{\kappa, \Lambda}$  приближается к 0,5 *р*<sub>Гл.ном</sub>. При уменьшении *h* значения  $p_{\rm VII}$  и  $p_{\rm K.Д}$  устремляются к  $p_{\rm ГЛ. HOM}$ . Чем меньше диаметр шарика, тем более плавное изменение давления в полости управления *p*<sub>уп</sub> и более широкий диапазон его регулирования с изменением h.

На рис. 3, *в* показаны характеристики расхода рабочей жидкости  $Q_{\text{III.K}}$ , поступающей на слив через шариковый клапан в зависимости от перемещения шарика *h*. С увеличением *h* для всех вариантов диаметра шарика получается почти одинаковое предельное значение  $Q_{\text{III.K}}$ . В выключенном состоянии шарикового клапана исходное значение *h* выбирается обычно в пределах 0,7...1,0 мм. При диаметрах дросселей  $d_{\text{др1}} = d_{\text{др2}} = 1$  мм получаем  $Q_{\text{III.K}} = 1,25$  л/мин. В процессе регулирования давления при изменении *h* расход на слив  $Q_{\text{III.K}}$  при одинаковых значениях регулируемого давления  $p_{\text{уп}}$  также оказывается практически одинаковым, что видно из сопоставления графиков на рис. 3,  $\delta$  и *в*. Так, например, при  $p_{\text{уп}} = 0,8$  МПа (см. рис. 3,  $\delta$ ) для клапана с шариком  $d_{\text{III.K}} = 0,8365$  л/мин, а для клапана с шариком  $d_{\text{III.K}} = 0,8306$  л/мин.

Однако диаметр шарика оказывает непосредственное влияние на величину необходимого усилия электромагнита. На рис. 3, r представлены графики зависимостей усилий электромагнита  $F_{3.M}$ от перемещения шарика h для рассматриваемых вариантов диаметра шарика. Увеличение диаметра шарика приводит к необходимости увеличения усилия электромагнита.

Для оценки влияния диаметров дросселей  $d_{\text{др1}}$  и  $d_{\text{др2}}$ , располагаемых в канале подачи рабочей жидкости к пилотному шариковому клапану, использован вариант с шариком  $d_{\rm III} = 4,763$  мм и диаметром седла  $d_{\rm c} = 3$  мм и проведено варьирование величинами  $d_{\text{др1}}$  и  $d_{\text{др2}}$  в пределах от 0,4 до 1,6 мм с шагом 0,2 мм. При этом принималось условие  $d_{\text{др1}} = d_{\text{др2}} = d_{\text{др}}$ . На рис. 4, а представлены графики зависимостей давления  $p_{y\Pi}$  от перемещения шарика h при различных значениях  $d_{дp}$ , а на рис. 4,  $\delta$  – соответствующие им графики изменения расхода рабочей жидкости на слив  $Q_{\rm III,K}$ .



Рис. 4. Влияние диаметров дросселей на характеристики изменения управляющего давления  $p_{yn}$ и расхода рабочей жидкости на слив  $Q_{III.K}$ : 1 –  $d_{дp} = 0,4$  мм; 2 –  $d_{dp} = 0,6$  мм; 3 –  $d_{dp} = 0,8$  мм; 4 –  $d_{dp} = 1,0$  мм; 5 –  $d_{dp} = 1,2$  мм; 6 –  $d_{dp} = 1,4$  мм; 7 –  $d_{dp} = 1,6$  мм

Как видно из рис. 4, *a*, с увеличением диаметров дросселей происходит более плавное изменение управляющего давления  $p_{\rm yff}$  в зависимости от величины *h*, но при этом существенно возрастает расход рабочей жидкости на слив  $Q_{\rm III.K}$  (см. рис. 4, *б*). Например, при  $d_{\rm дp} = 1$  мм получаем  $Q_{\rm III.K} = 1,234$  л/мин, а при  $d_{\rm дp} = 1,2$  мм  $Q_{\rm III.K} = 1,756$  л/мин, т. е. увеличение диаметра дросселя на 20 % приводит к возрастанию расхода на 42,3 %. Сравнение выполнено при условии h = 0,5 мм.

В ЭГПК фирмы «Коматрол» (Comatrol) использован шарик размером  $d_{\rm III} = 3,975$  мм при диаметре седла  $d_{\rm c} = 2,5$  мм, а дроссели 13 и 8 (см. рис. 2, б) имеют размеры соответственно  $d_{\rm дp1} = 0,5$  мм и  $d_{\rm дp2} = 0,7$  мм. Диаметры дросселирующих шеек золотника второй ступени этого ЭГПК одинаковы и равны 10 мм. Графики характеристик этого клапана показаны на рис. 5, a-c. На рис. 5, б приведены ха-

рактеристики выходного давления *р*<sub>вых</sub>, а на рис. 5, *г* – усилия электромагнита  $F_{\mathfrak{P},\mathsf{M}}$  в зависимости от перемещения шарика h при усилии пружины клапана 20 Н. Поскольку этот клапан выполнен с линейным золотником, то при давлении в главной масляной магистрали гидромеханической передачи  $p_{\Gamma\Pi} = 1,45$ МПа выходное давление р<sub>вых</sub> окажется равным 1,195 МПа, т. е. произойдет снижение реализуемой величины давления на 17,6 %. При номидавлении в гидросистеме нальном управления 2,0 МПа, характерном для многих известных гидромеханических передач, получаем  $p_{\text{вых}} = 1,745$  МПа. Кроме того, этот клапан во включенном состоянии фрикциона будет находиться постоянно в режиме осцилляции относительно положения регулирования, и процесс регулирования будет сопровождаться дополнительными потерями рабочей жидкости на слив.



Рис. 5. Характеристики шарикового пилотного клапана фирмы «Коматрол»: 1 – при  $p_{rn} = 1,45$  МПа; 2 – при  $p_{rn} = 2,0$  МПа

Авторами в 2012 г. разработана конструкция ЭГПК, предназначенная для управления фрикционами гидромеханической передачи карьерных самосвалов БелАЗ. Пилотная ступень выполнена на основе шарикового клапана с диаметром шарика  $d_{\rm III} = 7,938$  мм и диаметром седла клапана  $d_{\rm c} = 5$  мм, шарика максимальное перемещение h = 1 мм, вторая ступень ЭГПК – на основе золотникового гидроклапана с дифференциальным золотником. Диаметр пояска в полости управления  $d_{\rm VII} = 13$  мм, а диаметр пояска в полости пружины клапана  $d_{\text{пр}} = 12$  мм. Усилие пружины в положении регулирования выходного давления 20,536 Н. Для отработки конструкции в проекте было предусмотрено шесть вариантов золотников. Они различались конструктивным исполнением дросселирующих щелей и различной величиной перекрытия - от отрицательно-

го до положительного.

При выборе конструктивного исполнения золотника использованы результаты исследований, изложенные в [3], согласно которым при сплошных кольцевых кромках поясков золотника в процессе его осциллирующих колебаний относительно положения регулирования происходит очень резкое изменение площади дросселирующих щелей, что вызывает возникновение больших амплитуд колебаний регулируемого давления *р*<sub>вых</sub>. Поэтому на кромках золотника выполнялись различные по форме и размерам профилированные канавки, которые позволили существенно уменьшить величину открытия дросселирующих щелей в процессе осцилляции золотника. Использованные авторами варианты исполнения этих канавок приведены в [3]. Выбор формы и размеров канавок зависит от геометрических размеров золотника. Эти рекомендации применимы также для пилотных золотниковых клапанов.

Изготовление ЭГПК осуществлено в экспериментальном цехе ОАО «Белорусский автомобильный завод», а пропорциональный электромагнит для него изготовлен на предприятии ОАО «Измеритель» (г. Новополоцк).

Испытания созданного ЭГПК проводились в научно-исследовательской лаборатории кафедры «Автомобили» БРУ на специальном стенде, оборудованном насосной станцией и объектом управления в виде гидроцилиндра, объем рабочей полости которого незначительно отличается от объема гидроцилиндра фрикциона гидромеханической передачи. Управление осуществлялось посредством микропроцессорного контроллера модели RC2/2-21 фирмы «Бош Рэксрот» (Bosch Rexroth AG). Для получения информации об исследуемых процессах функционирования ЭГПК использовалось USB-устройство сбора данных серии 6009 компании «Нэйшио-Инструментс» (National нал Instru-Осуществлялась регистрация ments).

изменения главного давления  $p_{\Gamma \Lambda}$  на входе в ЭГПК, создаваемого гидростанцией, давления в полости управления  $p_{\rm y\Pi}$ , формируемого шариковым пилотным клапаном, давления на выходе из второй ступени ЭГПК  $p_{\rm BЫX}$  и изменения управляющего тока в обмотке пропорционального электромагнита  $I_{\rm 3.M}$ .

В процессе испытаний получены статическая характеристика ЭГПК, переходные характеристики и характеристики процесса управления при имитации включения фрикциона гидромеханической передачи.

Статическая характеристика представлена на рис. 6. Она отображает зависимость формируемого выходного давления  $p_{\rm Bыx}$  от величины тока  $I_{\rm 3.M}$  в обмотке электромагнита. На дополнительной оси абсцисс отложены значения управляющего давления  $p_{\rm yn}$ , формируемого шариковым пилотным клапаном.



Рис. 6. Статическая характеристика ЭГПК

График 1 получен в процессе изменения тока при его повышении, а график 2 – при понижении. Расхождение этих графиков характеризует гистерезис статической характеристики. Регулирование  $p_{\rm BbIX}$  можно осуществлять, начиная со значения 0,5 А и до максимальной расчетной величины 1,4 А, на которую рассчитан использованный в эксперименте электромагнит. При этом выходное давление  $p_{\rm BbIX}$  изменяется в пределах от 0,1 до 1,4 МПа.

На рис. 7, a и  $\delta$  приведены переходные характеристики, полученные при скачкообразном изменении тока  $I_{3.M}$  в обмотке электромагнита. Графики на рис. 7, a соответствуют золотнику с отрицательным перекрытием дросселирующих щелей, обеспечиваемых



Рис. 7. Переходные характеристики ЭГПК

На графиках приняты следующие обозначения временных интервалов циклограмм:  $t_{6.3}$  – время быстрого заполнения гидроцилиндра;  $t_{M.3}$  – время медленного заполнения гидроцилиндра;  $t_p$  – время регулирования давления в гидроцилиндре после полного перемещения поршня;  $t_{п.д}$  – время подъема давления до номинального уровня. В

профилированными канавками. Величина отрицательного перекрытия составляла (-0,4) мм. На рис. 7,  $\delta$  приведены графики переходной характеристики при положительном перекрытии +0,8 мм. Кольцевые кромки поясков обоих золотников выполнены с положительными перекрытиями соответственно +1,3 и +2,5 мм. Из приведенных графиков видно, что при отрицательном перекрытии амплитуда всплеска управляемого выходного давления  $p_{вых}$  значительно меньше, чем при положительном, и затухание колебаний происходит быстрее.

На рис. 8, a и  $\delta$  показаны характеристики процесса управления, полученные при тех же золотниках, что и на рис. 7, a и  $\delta$ .



период времени  $t_{6.3}$  ШИМ контроллера обеспечивает высокое значение тока в обмотке электромагнита  $I_{3.M}$ , поэтому пилотный клапан поддерживает высокий уровень давления в полости управления  $p_{yn}$ . В результате клапан второй ступени открыт и гидроцилиндр заполняется с высокой скоростью потока рабочей жидкости.



Рис. 8. Графики процессов функционирования ЭГПК, полученные при эксперименте

Затем на этапе времени  $t_{\rm M.3}$  величину тока понижают, что приводит к снижению давления  $p_{\rm yfl}$ . При этом давление на выходе ЭГПК  $p_{\rm Bbix}$  также понижается, т. к. вторая ступень осуществляет дросселирование потока жидкости, что приводит к уменьшению скорости заполнения гидроцилиндра. Это необходимо для того, чтобы снизить скачок давления в гидроцилиндре в момент остановки поршня.

Результаты экспериментов показывают, что при положительном перекрытии дросселирующих щелей золотникового клапана второй ступени ЭГПК в момент остановки поршня происходит значительный всплеск давления  $p_{вых}$ (см. рис. 6,  $\delta$ ), что негативно отражается на качестве процессов управления включением фрикциона при переключении передачи. В трансмиссии автомобиля при этом могут возникать пиковые возрастания вращающего момента, со-

провождаемые продольными толчками массы автомобиля, снижающие комфортность условий работы водителя.

При использовании золотникового клапана с отрицательным перекрытием скачок давления  $p_{\text{вых}}$  значительно меньше, чем с положительным (см. рис. 6, а). Но в этом случае в течение времени процесса регулирования давления t<sub>p</sub> понижается главное давление  $p_{\Gamma\Pi}$ , т. к. в таком клапане обе дросселирующие щели (подачи в гидроцилиндр фрикциона и слива) открыты, и происходит потеря некоторого количества рабочей жидкости, поступающей через клапан на слив. При неудачном выборе величины перекрытия это может привести к существенному падению главного давления  $p_{\Gamma\Pi}$ , особенно на низкоскоростных режимах работы двигателя, когда снижается подача гидронасоса гидромеханической передачи. В результате возникает проблема формирования пилотным клапаном управляющего давления  $p_{\rm VII}$ , и качество процесса переключения передач может существенно ухудшиться.

У клапана с положительным перекрытием на интервале времени *t*<sub>p</sub> регулирования давления *p*<sub>вых</sub> обеспечивается поддержание высокого уровня главного давления  $p_{\Gamma \pi}$  (см. рис. 6, б).

Полученные результаты испытаний позволяют сделать следующие выводы. Созданная конструкция ЭГПК обеспечивает линейную зависимость  $p_{\rm Bbix}$  от  $I_{\rm Э.M}$  и имеет приемлемую величину гистерезиса статической характеристики. Применение золотникового клапана регулятора-распределителя с отрицательным перекрытием дросселирующих щелей и рациональной конструкцией профилированных канавок на кольцевых кромках золотника позволяет снизить до приемлемой величины амплитуду всплеска регулируемого давления р<sub>вых</sub> в момент остановки поршня, получить быстрое затухание колебаний давления и в дальнейшем в течение времени регулирования t<sub>n</sub> плавное без колебаний изменение регулируемого давления в соответствии с изменением величины управляющего сигнала тока  $I_{2,M}$ . Можно рекомендовать для клапана второй ступени отрицательное перекрытие в пределах (-0,2...-0,4) мм, а для пилотного золотникового клапана положительное в пределах 0,1...0,2 мм.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мехатронная система автоматического управления ГМП карьерного самосвала / В. П. Тарасик, [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 12–15.

2. Диагностирование гидромеханических передач мобильных машин : монография / Н. Н. Горбатенко [и др.] ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. П. Тарасика. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 511 с.

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

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

Статья сдана в редакцию 15 января 2014 года

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

николай николаевич Гороатенко, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. E-mail: harb\_60@tut.by.

Виктор Сергеевич Савицкий, аспирант, Белорусско-Российский университет. E-mail: 6270487@gmail.com.

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

**Николай Николаевич Gorbatenko,** PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: harb\_60@tut.by.

Viktor Sergeyevich Savitsky, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail:6270487@gmail.com.

# УДК 621.97

# Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, А. А. Жолобов

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МЕТОДА НАСТРОЙКИ РЕЗЦА

## UDC 621.97

## D. G. Shaturov, G. F. Shaturov, A. A. Zholobov

# THE INVESTIGATION OF ACCURACY OF SHAFT MACHINING DEPENDING ON THE METHOD OF CUTTER ADJUSTMENT

#### Аннотация

Представлена методика расчета погрешностей для двух методов настройки призматического резца на размер при точении валов (для метода пробных проходов и промеров и метода автоматического получения размеров на настроенном станке), учитывающая размерный износ лезвия инструмента и деформацию элементов технологической системы. Приведены зависимости и режимы обработки, позволяющие осуществить управление процессом для обеспечения заданной точности обработки.

#### Ключевые слова:

обработка, резец, точность, погрешность, деформация, технологическая система.

#### Abstract

The paper gives the techniques of calculating errors for two methods of adjusting a prismatic cutter according to the size when turning shafts, the former being the method of test cuts and measurements and the latter being the method of receiving measurements automatically on an adjusted machine. The techniques take into account the dimensional wear of a cutting tool edge and the deformation of elements of the technological system. Dependences and machining conditions are presented, which control the process to secure a preset accuracy of machining.

## Key words:

treatment, cutter, accuracy, error, deformation, technological system.

поверхностей При обработке призматическим резцом систематическая погрешность формы обработанной заготовки складывается из двух величин: погрешности, обусловленной изменением жёсткости элементов технологической системы резания (ТСР) в процессе перемещения резца вдоль оси обрабатываемой заготовки, и переменной погрешности, обусловленной размерным износом лезвия резца [1]. Резец перемещается вдоль оси заготовки от задней опоры к передней, происходит сближение этой оси с резцом и уменьшается диаметр обрабатываемой поверхности вследствие изменения упру-

гой деформации элементов ТСР от максимального значения в начале обработки до минимального, соответствующего положению резца в лимитирующем сечении вала, расположенном от правого торца заготовки на расстоянии x<sub>0</sub> [2]. Поверхность в результате этой погрешности имеет седлообразную форму с наибольшим диаметром в начале обработки. Одновременно при перемещении резца вдоль оси заготовки происходит увеличение расстояния от формообразующей поверхность точки лезвия вершины резца до оси заготовки – вследствие радиального износа лезвия. Из-за образования второй погрешности

© Шатуров Д. Г., Шатуров Г. Ф., Жолобов А. А., 2014

обработанная поверхность имеет форму прямого конуса с наибольшим диаметром в конце обработки.

Первую и вторую погрешность можно определить на основании результатов исследований, представленных в [1, 3].

Разработана методика нахождения погрешности при получистовой обработке с учетом интенсивности износа лезвия резца в период приработки и в период установившегося его износа, позволяющая определить оптимальные режимы резания, а также необходимость и количество поднастроек резца на размер в зависимости от жесткости элементов TCP.

После получистовой обработки призматическим резцом диаметральная погрешность поверхности вдоль оси заготовки переменна и определяется по зависимости, левая часть которой (в квадратных скобках) представляет собой погрешность, связанную с жесткостью элементов TCP, а правая часть – погрешность обработки, обусловленную износом лезвия:

$$\Delta D = 2 \left\{ P_{y_1} \left[ \omega_{3\delta_1} - \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \omega_{3\delta_1} - \left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{n\delta_1} - \left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{n\delta_1} \right] - \delta_0 \left(\frac{\tau}{T_0}\right)^{n_0} K_p \right\},$$

где  $\omega_{3\delta_1}, \omega_{n\delta_1}$  – податливость задней и передней опоры вала, используемого при получистовой обработке, соответственно, мкм/Н;  $\tau$  – время резания, мин;  $P_{y_1}$  – радиальная составляющая силы резания при получистовой обработке, Н;  $K_p$  – коэффициент перевода линейного износа задней поверхности резца в радиальный,  $K_p \approx tg\alpha_3$  [1];  $\alpha_3$  – задний угол заточки резца;  $\delta_0$  – оптимальный износ задней поверхности резца, мкм;  $T_0$  – период стойкости инструмента, мин; l – длина обрабатываемой поверхности вала, мм; *x* – расстояние от правого торца заготовки до расположения резца, мм; *n*<sub>0</sub> – показатель степени.

Влияние составляющих  $P_z$  и  $P_x$ силы резания незначительно [3], и оно не учитывалось.

При точении заготовки вала изменяется глубина резания: по сравнению с номинальной (настроечной) она увеличивается вследствие уменьшения упругой деформации элементов ТСР при перемещении резца от менее жесткой задней к наиболее жесткой передней опоре вала и одновременно уменьшается вследствие размерного износа лезвия резца.

Максимальная погрешность рассчитывается исходя из разницы диаметральных размеров обработанной заготовки в начале обработки и в лимитирующем сечении или в конце обработки, где размерный износ лезвия резца максимален. Расположение лимитирующего сечения вала вдоль оси заготовки от начала обработки x<sub>0</sub> определяется положением резца при наименьшем расстоянии оси заготовки от геометрической линии центров станка или наибольшем ее отстоянии от начального положения в начале обработки [2].

$$\left(\frac{x}{l}\right)_0 = \frac{\omega_{_{3\tilde{o}}}}{\omega_{_{3\tilde{o}}} + \omega_{_{n\tilde{o}}}} \ ,$$

где  $\left(\frac{x}{l}\right)_0$  – расположение лимитирую-

щего сечения вала от начала обработки (от правого торца вала).

Настройка резца на размер осуществляется в начале обработки.

Тогда для лимитирующего сечения вала при обработке первой заготовки можно записать (рис. 1)

$$\begin{split} \Delta \boldsymbol{\varPi}_{30\phi}^{non} &= 2 \left( \boldsymbol{\varDelta}_{p_1} - \boldsymbol{\delta}_{p_1} \right) = 2 \boldsymbol{\delta}_{\phi_1} \leq \boldsymbol{\delta}_1; \\ \boldsymbol{\varDelta}_{p_1} &= Y_0 - Y_3; \end{split}$$

$$\begin{split} Y_{0} &= P_{y_{1}} \cdot \omega_{3\delta_{1}} = C_{p_{1}} t_{1}^{0,9} \omega_{3\delta_{1}}; \\ Y_{3} &= C_{p_{1}} t_{1}^{0,9} \cdot K_{t} \cdot \omega_{c_{1}}; \\ C_{p_{1}} &= 2430 \cdot S_{1}^{0,6} \cdot V_{1}^{-0,3}; \\ K_{t} &= \left(1 + \frac{Y_{0} - Y_{3} - \delta_{p_{1}}}{1000t_{1}}\right)^{0,9}; \\ \omega_{c_{1}} &= \frac{\omega_{3\delta_{1}} \cdot \omega_{n\delta_{1}}}{\omega_{3\delta_{1}} + \omega_{n\delta_{1}}}; \\ \Delta_{p_{1}} &= C_{p_{1}} t_{1}^{0,9} \left(\omega_{3\delta_{1}} - K_{t} \omega_{c_{1}}\right), \quad (1) \end{split}$$

где  $\Delta \mathcal{I}_{30\phi}^{non}$  – диаметральная погрешность при получистовой обработке, мкм;  $\delta_1$  – технологический допуск по-

верхности вала при получистовой обработке, мкм;  $\Delta_{p_1}$  – погрешность обработки, обусловленная упругими перемещениями элементов ТСР в лимитирующем сечении вала, мкм;  $Y_0, Y_3$  – упругие перемещения оси заготовки в начальном и лимитирующем сечении вала, мкм;  $t_1$  – глубина резания, мм;  $K_t$  – коэффициент, учитывающий изменение глубины резания обусловленной износом резца и упругой деформацией опор вала;  $V_1$  – скорость резания, м/мин;  $\mathcal{O}_{c_1}$  – податливость технологической системы резания в лимитирующем сечении вала, мкм/Н.



Рис. 1. Схема образования погрешностей обработки при достижении точности методом индивидуальной настройки резца на размер: 1 – упругая деформация заготовки; 2 – кривая размерного износа лезвия резца; 3 – результирующая кривая положения вершины резца относительно оси заготовки;  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  – минимальный и максимальный радиусы обработанной поверхности вала

В первом приближении расчета погрешности можно принять  $K_t = 1, 0$ .

Тогда

$$\Delta_{p_{1}} = P_{y_{1}} \Delta \omega = C_{p_{1}} t_{1}^{0.9} \Delta \omega_{1} ; \quad (2)$$

$$\Delta \omega_{1} = \omega_{3\delta_{1}} - \omega_{c_{1}} = \frac{\omega_{3\delta_{1}}}{\omega_{3\delta_{1}} + \omega_{n\delta_{1}}};$$
  
$$\delta_{p_{1}} = \frac{\delta_{0}}{T_{0}^{n_{0}}} \tau_{1}^{n_{0}} \operatorname{tg} \alpha_{3} = \delta_{p_{0}} \left(\frac{\omega_{3\delta_{1}}}{\omega_{3\delta_{1}} + \omega_{n\delta_{1}}}\right)^{n_{0}}; (3)$$

2

$$\begin{split} \delta_{p_0} &= \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \tau_0^{n_0} \operatorname{tg} \alpha_3; \\ \tau_0 &= \frac{l}{S_1 n}; \\ \tau_1 &= \tau_0 \frac{\omega_{3\delta_1}}{\omega_{3\delta_1} + \omega_{n\delta_1}}; \\ \delta_{\phi_1} &= \Delta_{p_1} - \delta_{p_1} = \\ &= P_{y_1} \Delta \omega_1 - \delta_{p_0} \left( \frac{\omega_{3\delta_1}}{\omega_{3\delta_1} + \omega_{n\delta_1}} \right)^{n_0}, \, (4) \end{split}$$

где  $\delta_{p_0}, \delta_{p_1}$  – размерный износ лезвия призматического резца за время обработки  $\tau = \tau_0$  и  $\tau = \tau_1$  соответственно, мкм;  $\tau_0, T_0$  – время обработки одной заготовки и период стойкости призматического резца, мин;  $S_1$  – подача, мм/об;  $\tau_1$  – время обработки заготовки от начала работы инструмента до расположения лимитирующего сечения, мин; n – частота вращения заготовки, мин<sup>-1</sup>;  $\delta_{\phi_1}$  – отклонение профиля продольного сечения (формы) при обработке первой заготовки, мкм.

Заданной точности обработки заготовки можно достигнуть двумя методами настройки: методом пробных ходов и промеров, т. е. при индивидуальной настройке резца на размер, и методом автоматического получения размеров на настроенном станке.

При индивидуальной настройке резца на размер диаметральная погрешность формы или отклонение профиля продольного сечения вала в лимитирующем сечении и в конце обработки *N*-й заготовки

$$\Delta D_{30\phi}^{non} = 2\delta_{\phi_1 N};$$

$$\Delta D_0^{non} = 2\delta_{\phi_0 N};$$
(5)

$$\delta_{\phi_1 N} = P_{y_1} \Delta \omega_1 - \delta_{p_1 N} \le \delta_1 / 2; \quad (6)$$

$$\delta_{p_1N} = \delta_{p_0} [(N_3 - 1 + \frac{\omega_{3\delta_1}}{\omega_{3\delta_1} + \omega_{n\delta_1}})^{n_0} - (N_3 - 1)^{n_0}]; \quad (7)$$

где  $\Delta D_0^{non}$  – погрешность обработки *N*-й заготовки при x = l.

$$\begin{split} \delta_{\phi_0 N} &= \Delta_{p_0} - \delta_{p_0 N} \le \delta_1 / 2; \\ \Delta_{p_0} &= P_{y_1} \left( \omega_{3\delta} - \omega_{n\delta_1} \right); \\ \delta_{p_0 N} &= \delta_{p_0} \left[ N_{3}^{n_0} - (N_{3} - 1)^{n_0} \right], \end{split}$$

где  $\delta_{\phi_1 N}, \delta_{\phi_0 N}$  – отклонение профиля продольного сечения (формы) в лимитирующем сечении вала и в конце обработки N-й заготовки, мкм (см. рис. 1);  $N_3$  – количество обработанных заготовок, шт.;  $\delta_{p_1 N}$  – прирост размерного износа лезвия резца за время обработки N-й заготовки при  $\tau = \tau_1$ , мкм;  $\Delta_{p_0}$  – погрешность обработки, обусловленная упругим отжатием заготовки в конце обработки, мкм;  $\delta_{p_0 N}$  – прирост размерного износа лезвия резца за время обработки N-й заготовки, мкм.

Используя зависимость (6), можно установить режимы резания, обеспечивающие условие  $\delta_{\phi_1 N} \leq \delta_1 / 2$ .

$$\frac{S_1^{0,6} \cdot t_1^{0,9}}{V_1^{0,3}} \le \frac{1}{2430 \cdot \Delta \omega_{\rm l}} \left(\frac{\delta_{\rm l}}{2} + \delta_{p_{\rm l}N}\right)$$

или

$$V_{1} \ge \left[\frac{2430 \cdot S_{1}^{0,6} \cdot t_{1}^{0,9} \cdot \Delta \omega_{1}}{\delta_{1} / 2 + \delta_{p_{1}N}}\right]^{\frac{1}{0,3}}$$

Таким образом, при индивидуальной настройке резца на размер при разной жесткости опор технологической системы (TC) размерный износ лезвия резца уменьшает погрешность обработки, притом в большей степени при об-

работке первой заготовки  $(\delta_{\phi_1} < \Delta_{p_1})$  (см. рис. 1).

Рассмотрим способ обработки, когда заданная точность достигается методом автоматического получения размеров на настроенном станке, например, на токарном станке с ЧПУ. Поскольку положение резца после первой его настройки на размер относительно технологической базы не меняется, то глубина резания при обработке очередной заготовки уменьшается на величину предшествующего размерного износа лезвия резца (рис. 2).



Рис. 2. Схема образования погрешностей обработки при достижении точности методом автоматического получения размеров на настроенном станке: 1 – упругая деформация заготовки; 2 – кривая размерного износа лезвия резца; 3 – результирующая кривая положения вершины резца относительно оси заготовки;  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  – минимальный и максимальный радиусы обработанной поверхности вала

$$t = t_1 - \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \tau_0^{n_0} \cdot K_p \cdot (N_3 - 1)^{n_0}$$

ИЛИ

$$t = t_1 - \delta_{p_0} \left( N_3 - 1 \right)^{n_0}$$

где *t*<sub>1</sub> – начальная глубина резания. Тогда

$$\Delta_{p_1N} = P_{y_1} \cdot K_{t_1} \cdot \Delta \omega_1, \qquad (8)$$

$$K_{t_1} = \left[1 - \frac{\delta_{p_0} \left(N_3 - 1\right)}{1000t_1}\right]^{0,9},$$

где  $K_{t_1}$  – коэффициент, учитывающий изменение глубины резания при методе автоматического получения размеров на настроенном станке.

Применительно к продольному точению принята следующая зависимость для определения радиальной составляющей  $P_{y_1}$  силы резания [4]:

$$P_{y_1} = \frac{2430 \cdot S_1^{0,6} \cdot t_1^{0,9}}{V_1^{0,3}}$$

Тогда отклонение профиля продольного сечения или погрешность формы находят из зависимости, аналогичной (4):

$$\Delta D_{30\phi}^{non} = 2\delta_{\phi_1 N} \le \delta_1;$$
  
$$\delta_{\phi_1 N} = P_{y_1} K_{t_1} \Delta \omega_1 - \delta_{p_1 N}. \qquad (9)$$

При обработке заготовок методом автоматического получения размера на настроенном станке, кроме погрешности формы продольного сечения, учитывают и погрешность размера.

Погрешность размера включает в себя погрешность формы при обработке первой заготовки и общий размерный износ лезвия резца (см. рис. 2).

$$\Delta D_{30p}^{non} = 2\delta_{n_1} \le \delta_1. \tag{10}$$

$$\begin{split} \delta_{n_1} &= \Delta_{p_1} - \delta_{p_0} \left( \frac{\omega_{_{3\delta_1}}}{\omega_{_{3\delta_1}} + \omega_{_{n\delta_1}}} \right)^{n_0} + \\ &+ \delta_{p_0} \left( N_{_3} - 1 \right)^{n_0} \le \delta_1 / 2 \,, \end{split} \tag{11}$$

где  $\Delta D_{30p}^{non}$  – погрешность размера, мкм;  $\delta_{n_1}$  – погрешность размера, отнесенная к радиусу заготовки.

Исходя из зависимости (11) определяется время или количество заготовок, которые можно обработать до первой подстройки резца на размер, т. е.

$$\begin{split} N_{_{3H}} = & \left[ \frac{\delta_{_1} / 2 - \Delta_{p_1}}{\delta_{p_0}} + \left( \frac{\omega_{_{3\delta_1}}}{\omega_{_{3\delta_1}} + \omega_{_{n\delta_1}}} \right)^{n_0} \right]^{\frac{1}{n_0}} + 1; \\ \tau_{_{HC}} = N_{_{3H}} \cdot \tau_0, \end{split}$$

где  $N_{3H}$  – количество заготовок, обработанных до первой поднастройки резца на размер;  $\tau_{Hc}$  – время очередной настройки резца, мин.

Фактическое количество обработанных заготовок  $N_3$ , соответствующее получению максимального (допустимого) размерного износа лезвия, определяется из следующей зависимости:

$$\begin{split} \delta_p^{\max} &= \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \big( \tau_0 N_{_{3}\max} \big)^{n_0} \cdot k_p = \delta_{p_0} \cdot N_{_{3}\max}^{n_0} \,; \\ N_{_{3}\max} &= \left( \frac{\delta_p^{\max}}{\delta_{p_0}} \right)^{\frac{1}{n_0}} \leq N_{_{3}}; \\ \delta_p^{\max} &= \delta_0 \cdot K_p \,, \end{split}$$

где  $N_{3 \max}$ ,  $N_3$  — расчетное и фактическое количество обработанных заготовок за период стойкости резца;  $\delta_p^{\max}$  максимально допустимый размерный износ лезвия резца.

Общее количество настроек резца на размер

$$Z_p = \frac{2\delta_p^{\max}}{\delta_1 - \Delta}.$$

Тогда

$$Z \ge Z_p + 1;$$
$$Z \ge Z_p + 1.$$

где  $Z_p$ , Z – расчетное и фактическое число поднастроек резца на размер;  $\Delta$  – величина допуска на настройку резца на размер.

Так, например, при обработке первой заготовки вне зависимости от метода настройки резца на размер  $d = 100, 8^{-0.14}$  мм длиной l = 1000 мм на станке 16К20 с  $\omega_{30} = 0,3$  мкм/H; призматическим  $\omega_{n\delta} = 0,06 \text{ MKM/H}$ резцом режимах: на подача  $S_1 = 0,5 \text{ MM/of},$ глубина резания скорость t = 0,8 MM,резания

$$\begin{split} V_1 &= 250 \quad \text{м/мин}; \text{ частота вращения за-}\\ \text{готовки } n &= 800 \quad \text{мин}^{-1}, -\text{ были получе-}\\ \text{ны следующие значения: } T_0 &= 22 \quad \text{мин}; \\ P_{y_1} &= 250 \text{ H}; \\ \Delta_{p_1} &= 62,5 \text{ мкм}; \\ \sigma_0 &= 2,5 \text{ мкм}; \\ \tau_0 &= 2,5 \quad \text{мин}; \\ \delta_{p_1} &= 62,5 - 48,8 = 13,7 \quad \text{мкм}; \\ \Delta D_3^{non} &= 27,4 \quad \text{мкм}. \end{split}$$

При обработке второй заготовки без изменения настройки резца на размер при  $K_{t_1} = 0,942$  были получены следующие погрешности:  $\Delta_{p_1} = 58,87$  мкм;

 $\delta_{p_1} = 8,34 \text{ MKM};$   $\delta_{\phi_1} = 50,5 \text{ MKM};$  $\delta_{n_1} = 13,7+51 = 64,7 \text{ MKM};$ 

 $\Delta D_{30}^{non} = 129,4$  мкм.

Количество заготовок, обработанных до первой поднастройки резца на размер  $N_{_{34}} = 2,477$  шт. (принято  $N_{_{3H}} = 2$ ), время до первой поднастройки резца на размер  $\tau_{_{HC}} = 5$  мин, общее количество деталей, обработанных за период стойкости резца,  $N_{_3}^{\max} = 8$  деталей, общее число поднастроек Z = 2, допуск на настройку резца  $\Delta = 10$  мкм.

Повышенный износ лезвия в период приработки приводит к уменьшению на 22 %  $(1-48,8/62,5) \cdot 100$  % погрешности формы и к увеличению в 3...5 раз (129,6/27,4) = 4,73 погрешности размера при следующей операции.

Таким образом, разработанная методика позволяет на стадии проектирования технологической операции определить с учетом характеристики ТСР и режимов обработки количество поднастроек резца на размер для обеспечения заданной точности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шатуров, Г. Ф. Исследование процесса изнашивания токарного инструмента / Г. Ф. Шатуров, В. А. Лукашенко, Д. Г. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 113–118.

2. Шатуров, Г. Ф. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск : Технопринт, 2001. – 460 с.

3. Исследование закономерностей формообразования поверхностей заготовок валов при точении / Ж. А. Мрочек [и др.] // Вестн. БНТУ. – 2006. – № 3. – С. 30–34.

4. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.

## Статья сдана в редакцию 15 января 2014 года

**Денис Геннадьевич Шатуров,** инженер, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-67-98. **Геннадий Филиппович Шатуров,** д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-67-98.

**Александр Алексеевич Жолобов,** канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-23-04-51.

Denis Gennadyevich Shaturov, engineer, Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-25-67-98.

Gennady Filippovich Shaturov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-25-67-98.

Aleksandr Alekseyevich Zholobov, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-23-04-51.
## УДК 621.787

# В. К. Шелег, А. М. Довгалев, А. А. Жолобов, Н. А. Леванович, И. А. Тарадейко

# МОДЕЛИРОВАНИЕПРОЦЕССАСОВМЕЩЕННОЙУПРОЧНЯЮЩЕЙОБРАБОТКИИМПУЛЬСНО-УДАРНЫМРАСКАТЫВАНИЕМИ ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

# UDC 621.787

## V. K. Sheleg, A. M. Dovgalev, A. A. Zholobov, N. A. Levanovich, I. A. Taradeiko

# MODELING OF THE PROCESS OF COMBINED STRENGTHENING TREATMENT BY IMPULSE-IMPACT ROLLING AND A ROTATING MAGNETIC FIELD

#### Аннотация

Предложен новый способ формообразования поверхности отверстия цилиндра импульсноударным деформированием в магнитном поле. Разработана конструкция инструмента для отделочноупрочняющей обработки. Выполнено математическое моделирование процесса совмещенной упрочняющей обработки импульсно-ударным деформированием и вращающимся магнитным полем, при котором обеспечивается комбинированное энергетическое воздействие на зону обработки. Получены аналитические зависимости для определения кинетостатических характеристик приводных и деформирующих шаров инструмента.

#### Ключевые слова:

упрочнение, цилиндр, пластическое деформирование, импульсно-ударное раскатывание, магнитное поле, магнитная система, микрорельеф.

#### Abstract

A new method for the formation of the surface of a cylinder bore by impulse-impact deformation in the magnetic field is suggested. The tool for finishing-strengthening treatment has been designed. The mathematical modeling of the process of combined strengthening treatment by impulse-impact deformation and a rotating magnetic field has been done, in which a combined energy action on the area of treatment is produced. Analytical dependences to determine kinetostatic characteristics of driving and deformation balls of the tool have been received.

#### Key words:

impulse-impact rolling, strengthening, cylinder, plastic deformation, pulse-shock rolling, magnetic field, magnetic system, micro-relief.

## Введение

Машиностроительная промышленность изготовляет цилиндры, используемые в пневмо- и гидросистемах различных машин и механизмов, к качественным характеристикам внутренней рабочей поверхности которых предъявляются высокие требования.

Повышение качественных и эксплуатационных свойств внутренней поверхности цилиндров обеспечивают методами поверхностного пластического деформирования на финишных операциях технологического процесса. Для реализации технологий поверхностного пластического деформирования применяют раскатники жесткого и упругого типов. Наиболее перспективным является упрочнение поверхности цилиндров раскатниками упругого типа, обеспечивающими стабильные силовые па-

© Шелег В. К., Довгалев А. М., Жолобов А. А., Леванович Н. А., Тарадейко И. А., 2014

раметры процесса и высокие качественные характеристики модифицированного поверхностного слоя [1, 2].

Однако традиционные технологии поверхностного пластического деформирования в определенной мере исчерпали свои технологические возможности. В связи с этим большой научный и практический интерес представляют современные технологии поверхностного пластического деформирования с комбинированным видом энергетического воздействия на упрочняемую поверхность детали, позволяющие получить модифицированный поверхностный слой с уникальными свойствами [3, 4].

К числу перспективных относится технология совмещенной упрочняющей обработки внутренней поверхности цилиндров импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся (постоянным или переменным) магнитным полем, позволяющая совместить в один технологический переход три операции: упрочнение поверхностного слоя детали импульсно-ударным раскатыванием, модификацию поверхностного слоя детали вращающимся магнитным полем инструмента, формирование на поверхности детали маслоудерживающего микрорельефа. При этом совмещение во времени процессов магнитного и импульсно-ударного деформирующего воздействий на локальный участок поверхности цилиндра обеспечивает модификацию структуры и фазового состава упрочненного слоя, имеющую технологическое значение и повышающую эксплуатационные характеристики поверхности [5, 6].

# Объект исследований

Совмещенную упрочняющую обработку внутренней поверхности цилиндра импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем осуществляют комбинированным инструментом, представленным на рис. 1.

Инструмент содержит: оправку 1; шайбы 2, 3, образующие кольцевые камеры 4, 5, соединенные между собой; деформирующие шары 6; приводные шары 7; магнитную систему для окружного перемещения приводных шаров 7, включающую магнитопроводный диск 8, обоймы 9, 10 и постоянные цилиндрические магниты 11, 12. Кольцевая камера 4 выполнена открытой, и в ней свободно расположены деформирующие шары 6. Приводные шары 7 установлены в кольцевой камере 5 с возможностью радиального и окружного перемещения, взаимодействия с деформирующими шарами 6. Цилиндрические постоянные магниты 11, 12 размещены в аксиальных отверстиях обойм 9, 10 и контактируют торцами с магнитопроводным диском 8. Силовые линии магнитного поля от цилиндрических постоянных магнитов 11, 12 проходят через магнитопроводный диск 8 и замыкаются на приводные шары 7. Вследствие этого на приводные шары 7 действует магнитное поле инструмента.

Инструмент снабжен магнитной системой для намагничивания поверхностного слоя детали, включающей кольцевые магнитопроводы 13. 14. втулки 15, 16, постоянные цилиндрические магниты 17, 18, установленые с равномерным угловым шагом в аксиальных отверстиях втулок 15, 16 и взаимодействующие с торцами кольцевых магнитопроводов 13, 14. Втулки 15, 16 и кольцевые магнитопроволы 13. 14 закреплены на шайбах 2, 3 соосно оправке 1, симметрично кольцевой камере 4 инструмента. Оправка 1, шайбы 2, 3, обоймы 9, 10 и втулки 15, 16 выполнены из немагнитопроводного материала.

Упрочняющую обработку осуществляют следующим образом. Оправку 1 инструмента закрепляют в шпинделе, а цилиндр 19 – в технологическом приспособлении на столе станка. Ось шпинделя станка совмещают с осью обрабатываемого отверстия.



б)



Рис. 1. Схема совмещенной упрочняющей обработки внутренней поверхности цилиндра импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем: а – общий вид схемы; б – поперечное сечение комбинированного инструмента

Инструмент вводят в отверстие и совмещают плоскость расположения геометрических центров деформирующих шаров 6 с торцом цилиндра 19. Инструменту сообщают вращение и перемещают с подачей S вдоль упрочняемой поверхности.

На поверхностный слой ферромагнитной детали действует вращающееся магнитное поле от постоянных цилиндрических магнитов 17, 18, концентрируемых в зоне обработки посредством кольцевых магнитопроводов 13 и 14.

действием вращающегося Пол магнитного поля от постоянных цилиндрических магнитов 11, 12 приводные шары 7 получают окружное перемещение вдоль кольцевой камеры 5 инструмента и периодически взаимодействуют с деформирующими шарами 6, которые, в свою очередь, передают энергию импульсно-ударного взаимодействия внутренней намагниченной поверхности цилиндра 19, осуществляя ее пластическое деформирование и формируя на ней микрорельеф в виде сопряжения поверхностей получаемых лунок. Совмещение во времени методов упрочнения поверхностного слоя цилиндра 19 импульсно-ударным деформированием и вращающимся магнитным полем инструмента позволяет использовать положительное влияние процессов друг на друга и получить поверхность с особыми физико-механическими свойствами, которые невозможно обеспечить известными методами поверхностного пластического деформирования.

Процесс совмещенной упрочняющей обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием осуществляется магнитно-механической системой, в состав которой входят: устройство намагничивания поверхностного слоя детали; вращающийся намагниченный магнитопроводный диск инструмента; приводные и деформирующие шары, установленные в сообщающихся кольцевых камерах инструмента с возможностью взаимодействия; упрочняемый цилиндр.

# Постановка задачи исследования

В настоящее время отсутствуют теоретические основы кинематики и динамики процесса совмещенной обработки импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем, что вызывает затруднение при назначении режимов комбинированного упрочнения и прогнозировании физикомеханических свойств и параметров микрорельефа формируемой поверхности. В связи с этим актуальной является разработка математической модели механической системы, реализующей процесс комбинированной упрочняющей обработки поверхности цилиндра импульсно-ударным раскатыванием в магнитном поле.

# Основная часть

Выполним математическое моделирование рассматриваемой магнитномеханической системы. При разработке математической модели введем следующие допущения:

 продольная ось инструмента расположена вертикально, а перемещение приводных и деформирующих шаров осуществляется в горизонтальной плоскости;

 – рассматриваем движение одного приводного и одного деформирующего шара, полагая, что все приводные и деформирующие шары инструмента находятся в одинаковых условиях;

 исследуем движение приводного шара в плоскости, нормальной оси вращения Оz инструмента в системе координат Оху;

 приводной и деформирующие шары рассматриваем как материальные точки массой m<sub>1</sub> и m<sub>2</sub>, помещенные в центр сфер соответствующих радиусов;

магнитным взаимодействием
 приводных и деформирующих шаров, а
 также магнитным взаимодействием

идентичных шаров друг с другом пренебрегаем;

магнитопроводный диск инструмента имеет намагниченный поверхностный слой толщиной h с однородными магнитными характеристиками;

 магнитным взаимодействием деформирующих шаров с намагниченной внутренней поверхностью цилиндра пренебрегаем;

 при отрыве природного шара от магнитопроводного диска инструмента оси координат приводного шара смещаются относительно осей координат магнитопроводного диска на сколь угодно малый угол, величину которого не учитываем.

Выполним последовательное моделирование имеющихся в процессе совмещенной упрочняющей обработки фаз движения приводного и деформирующего шаров.

1. Моделирование движения приводного шара от периферийной поверхности магнитопроводного диска до взаимодействия с деформирующим шаром.

Рассмотрим движение приводного шара относительно подвижных осей координат  $Ox_1y_1$ , связанных с центром масс приводного шара (система координат Оху связана с центром масс магнитопроводного диска) (рис. 2).

Запишем основное уравнение динамики относительного движения приводного шара:

$$m_{1}\vec{a}_{r} = \vec{G} + \vec{N} + \vec{\Phi}_{en} + + \vec{\Phi}_{e\tau} + \vec{F}_{\tau p} + \vec{\Phi}_{k} + \vec{F}_{M}, \qquad (1)$$

где  $m_1$  – масса приводного шара;  $\vec{a}_r$  – относительное ускорение центра масс приводного шара;  $\vec{G}$  – сила тяжести приводного шара (лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа);  $\vec{N}$  – нормальная реакция, действующая на приводной шар со стороны поверхности шайбы инструмента (лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости чертежа). Силы  $\vec{G}$  и  $\vec{N}$  уравновешивают друг друга;  $\vec{\Phi}_{en}$  – нормальная составляющая переносной силы инерции,

$$\Phi_{\rm en} = m_1 \omega^2 x \quad ; \qquad (2)$$

 $\vec{\Phi}_{e\tau}$  – касательная составляющая переносной силы инерции,

$$\Phi_{\rm e\tau} = m_1 \varepsilon r_{\rm H} \quad ; \qquad (3)$$

 $\omega$  – угловая скорость вращения магнитопроводного диска (при установившемся режиме  $\omega = \text{const}, \epsilon = 0, \Phi_{e\tau} = 0$ );  $r_{H}$  – начальное расстояние между геометрическими центрами магнитопроводного диска и приводного шара;  $r_{H} = r_{1} + r_{3}$ ;  $r_{1}, r_{3}$  – радиусы приводного шара и магнитопроводного диска соответственно;  $\vec{F}_{TP}$  – сила трения скольжения приводного шара о поверхность шайбы,

$$\vec{F}_{rp} = -fN \frac{\vec{V}_r}{V_r} = -fm_1g \frac{\dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}},$$
 (4)

где f – коэффициент трения скольжения приводного шара о поверхность шайбы инструмента;  $\vec{V}_r$  – вектор относительной скорости приводного шара;  $V_r$  – модуль вектора относительной скорости приводного шара;  $\vec{\Phi}_k$  – кориолисова сила инерции. Значения кориолисовой силы инерции  $\vec{\Phi}_k$  в проекциях на оси x, y:

$$\Phi_{kx} = 2m_1 \omega \dot{y} , \qquad (5)$$

$$\Phi_{kv} = -2m_1\omega \dot{x} \quad ; \qquad (6)$$

**F**<sub>M</sub> – сила магнитного притяжения приводного шара к периферийной поверхности намагниченного магнитопроводного диска.

Рассмотрим силу магнитного притяжения приводного шара  $\vec{F}_M$  в проекциях на оси координат x, y в соответствии с рис. 3.



Рис. 2. Схема движения приводного шара: а – в момент его отрыва от периферийной поверхности магнитопроводного диска; б – после его отрыва от магнитопроводного диска и перемещения к деформирующему шару; 1, 2 – приводной и деформирующий шары соответственно; 3 – поперечное сечение намагниченного вращающегося магнитопроводного диска



Рис. 3. Расчетная схема определения величины магнитной силы, действующей на приводной шар

Разобьем участок намагниченного слоя магнитопроводного диска, ограниченный произвольным углом  $2\psi_k$ , на множество участков, каждый из которых представляет собой элементарный постоянный магнит. Так как расстояние между геометрическими центрами такого элементарного магнита и приводного шара превышает размеры самого магнита, то справедливы формулы [7]:

$$\frac{dF_{Mx}(r_{m},\theta,\alpha)}{d\Psi} = \frac{3\mu_{0}p_{m1}p_{m2}}{4\pi r_{m}^{4}} \times \\ \times \left[2\cos\theta\cos(\theta-\alpha) - \sin\theta\sin(\theta-\alpha)\right] \\ \frac{dF_{My}(r_{m},\theta,\alpha)}{d\Psi} = \\ = \frac{3\mu_{0}p_{m1}p_{m2}}{4\pi r_{m}^{4}}\sin(\theta-\alpha),$$

ИЛИ

$$dF_{Mx}(r_{m},\theta,\alpha) = \frac{3\mu_{0}p_{m1}p_{m2}}{4\pi r_{m}^{4}} \times [2\cos\theta\cos(\theta-\alpha) - \sin\theta\sin(\theta-\alpha)]d\Psi; (7)$$

$$dF_{My}(r_{m},\theta,\alpha) =$$

$$= \frac{3\mu_{0}p_{m1}p_{m2}}{4\pi r_{m}^{4}}\sin(\theta-\alpha)d\Psi, \quad (8)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $p_{m1}$  – магнитный момент элементарного постоянного магнита;  $p_{m2}$  – магнитный момент приводного шара;  $\theta$  – угол смещения приводного шара относительно оси  $O_M x_M$  (см. рис. 3);  $\alpha$  – угол, определяющий положение вектора  $\vec{p}_{m2}$  [7],

$$\alpha = \arctan\left(\frac{3\cos\theta\sin\theta}{3\cos^2\theta - 1}\right); \qquad (9)$$

r<sub>m</sub> – расстояние между геометрическими центрами элементарного постоянного магнита и приводного шара.

Согласно рис. 3 из  $\Delta O_M CB$  следует, что

$$r_{\rm m} = \frac{O_{\rm M}B}{\cos\theta_{\rm k}} , \qquad (10)$$

где  $\theta_k$  – угол, определяющий положение радиуса-вектора  $\vec{r_m}$ , соединяющего геометрические центры крайнего элементарного постоянного магнита и приводного шара.

Из ДОСВ находим О<sub>м</sub>В:

$$O_{M}B = OC \cdot \cos \Psi_{k} - r_{3} + \frac{h}{2} =$$
$$= x \cdot \cos \Psi_{k} - r_{3} + \frac{h}{2}. \qquad (11)$$

Магнитный момент элементарного постоянного магнита определяем по зависимости [7]

$$p_{m1} = \frac{4\pi B \left(\frac{h}{2}\right)^3}{2\mu_0} , \qquad (12)$$

где В и h – величина магнитной индукции и толщина намагниченного поверхностного слоя магнитопроводного диска соответственно.

Магнитный момент приводного шара [7]

$$p_{m2} = \frac{(\mu - 1)Hr_1^3}{\mu + 2}$$
, (13)

где µ – магнитная проницаемость среды; Н – напряженность магнитного поля в точке, определяющей положение геометрического центра приводного шара.

При определении пределов интегрирования выражений (7) и (8) учитываем, что величина магнитной силы, действующей на приводной шар, зависит от расстояния между геометрическими центрами элементарного постоянного магнита и приводного шара. С достаточной степенью точности предел интегрирования принимаем равным  $\pm \Psi_k$ . Из  $\Delta OCB$  следует, что

$$\Psi_{\rm k} = \arcsin \frac{{\rm r}_{\rm l}}{{\rm OC}} , \qquad (14)$$

где  $\Psi_k$  – угол, определяющий положение крайнего элементарного постоянного магнита (для произвольного элементарного постоянного магнита  $\Psi_k = \Psi$ ;  $\theta_k = \theta$ ).

Установим зависимость между углами  $\Psi_k$  и  $\theta_k$ . Для этого рассмотрим крайний по расположению элементарный постоянный магнит (см. рис. 3).

Из ДОСВ следует, что

$$CB = OC \cdot \sin \Psi_k$$
.

Выразим СВ из ДОмСВ:

$$CB = OMB \cdot tg\theta_k$$
.

Тогда угол  $\theta_k$  определится как

$$\theta_{k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{OC} \cdot \sin \Psi_{k}}{\operatorname{OmB}}\right).$$
(15)

Проекции суммарной магнитной силы, действующей на приводной шар со стороны рассматриваемых элементарных постоянных магнитов магнитопроводного диска, на оси Ох и Оу:

$$\int_{0}^{F_{Mx}} dF_{Mx} = \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{4\pi} \times \\ \times \int_{-\Psi_k}^{\Psi_k} \frac{1}{r_m^4} [2\cos\theta\cos(\theta - \alpha) - \\ -\sin\theta\sin(\theta - \alpha)] d\Psi;$$
(16)

$$\int_{0}^{F_{My}} dF_{My} = \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{4\pi} \times$$
$$\times \int_{-\Psi_k}^{\Psi_k} \frac{1}{r_m^4} \sin(\theta - \alpha) d\Psi = 0. \quad (17)$$

При интегрировании выражений (16) и (17) учитываем значения параметров  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $r_m$  и  $O_M B$ , сведенных в систему (18):

$$\begin{cases} F_{Mx} = \frac{3\mu p_{m1} p_{m2}}{2\pi} \times \\ \times \int_{0}^{\Psi_{k}} \frac{1}{r_{m}^{4}} 2\cos\theta\cos(\theta - \alpha)d\Psi; \\ \alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{3\cos\theta\sin\theta}{3\cos^{2}\theta - 1}\right); \\ \theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{OC \cdot \sin\Psi}{O_{M}B}\right); \\ r_{m} = \frac{O_{M}B}{\cos\theta}; \\ O_{M}B = x \cdot \cos\Psi - r_{1} + \frac{h}{2}. \end{cases}$$
(18)

Так как угол  $\Psi = f(x)$ , то введем следующее обозначение:

$$F_{Mx} = m_1 A F_M(x), \qquad (19)$$

где А – постоянная величина,

$$A = \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{2\pi \cdot m_1} .$$
 (20)

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

$$\begin{cases} \ddot{x} = \omega^2 x + 2\omega \dot{y} - \\ - AF_M(x) - fg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \\ \ddot{y} = -2\omega \dot{x} - fg \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \end{cases} (21)$$

При решении системы (21) методами численного интегрирования следует соблюдать краевые условия координат центра масс и скорости приводного шара:

– начальные

$$\begin{split} t &= t_0; \, x = x_0; \, y = 0; \\ \dot{x} &= \dot{x}_0 \ ; \ \dot{y} = \dot{y}_0 \ ; \ \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = r_1 + r_3 \ ; \\ &- \text{текущие} \\ t &= t; \, x = x; \, y = 0; \\ \dot{x} &= \dot{x} \ ; \ \dot{y} = \dot{y} \ ; \ \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = x \ ; \end{split}$$

– конечные

$$\begin{split} t &= t_k; \, x = x_k; \, y = 0; \\ \dot{x} &= \dot{x}_k \; ; \; \dot{y} = \dot{y}_k \; ; \; \sqrt{x_k^2 + y_k^2} = x_k \; , \end{split}$$

где  $t_0$ ,  $t_k$ ,  $x_0$ ,  $x_k$ ,  $y_0$ ,  $y_k$ ,  $\dot{x}_0$ ,  $\dot{x}_k$ ,  $\dot{y}_0$ ,  $\dot{y}_k$  – время, координаты центра приводного шара и проекции скорости приводного шара на оси Ох и Оу в начальный и конечный моменты фазы движения приводного шара от магнитопроводного диска до взаимодействия с деформирующим шаром соответственно.

При численном интегрировании следует соблюдать условие

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

где OC<sub>max</sub> – максимально возможное расстояние между геометрическими центрами магнитопроводного диска и приводного шара (определяется конструкцией инструмента).

# 2. Моделирование взаимодействия приводного и деформирующего шаров.

Вращаясь с угловой скоростью вдоль кольцевой камеры инструмента, приводной шар периодически взаимодействует с деформирующим шаром. При этом считаем, что имеет место косой центральный удар (импульсы силы направлены по линии, соединяющей геометрические центры взаимодействующих шаров), а в зоне взаимодействия шаров ударное трение отсутствует.

Для исследования ударного взаимодействия приводного шара с деформирующим шаром (рис. 4) определим коэффициент восстановления при ударе [8]:

$$K = \frac{tg\alpha_1}{tg\alpha_2} , \qquad (22)$$

где К – коэффициент восстановления;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – углы падения и отражения приводного шара, равные углам ( $\vec{v}_{c1}^{\ }\vec{n}$ ) и ( $\vec{u}_{c1}^{\ }-\vec{n}$ ) соответственно ( $\vec{v}_{c1}^{\ }$  – вектор скорости центра масс приводного шара в момент начала удара;  $\vec{u}_{c1}$  – вектор скорости центра масс приводного шара в момент окончания удара);  $\vec{n}$  – вектор нормали, проведенной к поверхности приводного и деформирующего шаров в точке их соприкосновения.



Рис. 4. Расчетная схема ударного взаимодействия приводного шара с деформирующим шаром: 1 – приводной шар; 2 – деформирующий шар; 3 – поперечное сечение намагниченного вращающегося магнитопроводного диска

Определим проекции скорости приводного шара на оси n и т в начальный момент удара приводного шара о деформирующий шар:

$$\mathbf{v}_{1\tau} = (\mathbf{v}_{e} + \dot{\mathbf{y}}_{k}) \sin \gamma_{1} - \dot{\mathbf{x}}_{k} \cos \gamma_{1};$$
$$\mathbf{v}_{1n} = (\mathbf{v}_{e} + \dot{\mathbf{y}}_{k}) \cos \gamma_{1} + \dot{\mathbf{x}}_{k} \sin \gamma_{1}, \quad (23)$$

где  $v_e$  – переносная скорость центра приводного шара,  $v_e = \omega \cdot OC$ .

$$tg\alpha_1 = \frac{v_{1\tau}}{v_{1n}} =$$

$$=\frac{(\omega \cdot OC + \dot{y}_{\kappa})\sin\gamma_{1} - \dot{x}_{\kappa}\cos\gamma_{1}}{(\omega \cdot OC + \dot{y}_{\kappa})\cos\gamma_{1} + \dot{x}_{\kappa}\sin\gamma_{1}}.$$
 (24)

Тогда угол отражения

$$tg\alpha_{2} = \frac{(\omega \cdot OC + \dot{y}_{k})\sin\gamma_{1} - \dot{x}_{k}\cos\gamma_{1}}{(\omega \cdot OC + \dot{y}_{k})\cos\gamma_{1} + \dot{x}_{k}\sin\gamma_{1}} \cdot \frac{1}{K}, (25)$$

где  $\gamma_1$  — угол между нормалью n и осью Oy;  $\dot{x}_k, \dot{y}_k$  — проекции вектора скорости центра масс приводного шара на оси Ox и Oy в момент удара.

Согласно рис. 4, угол  $\gamma_1 = \gamma - \pi/2$ .

Из треугольника ОСоС следует, что

$$\gamma = \arccos \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

где  $a = OC = f(h_1); b = CC_0; c = OC_0.$ 

Для определения ОС запишем равенство

 $OCo - r_2 + h_1 = OC + r_1,$ 

откуда

$$OC = OC_0 - r_2 - r_1 + h_1,$$
 (26)

где  $\gamma$  – тупой угол треугольника OC<sub>0</sub>C; h<sub>1</sub> – натяг между приводным и деформирующим шарами (величина перекрытия вершин контактирующих шаров).

Запишем проекции скорости центра масс деформирующего шара на оси n и т:

$$\mathbf{v}_{2\tau} = \mathbf{v}_2 \cos\beta \;, \tag{27}$$

$$\mathbf{v}_{2n} = \mathbf{v}_2 \sin\beta \,, \tag{28}$$

где  $v_2$  – скорость центра масс деформирующего шара;  $\beta$  – угол между прямой  $OC_0$  и нормалью n.

Из теоремы синусов следует, что

$$\frac{\sin\beta}{OC} = \frac{\sin\gamma}{OC_0},$$

откуда

$$\sin\beta = \frac{OC\sin\gamma}{OC_0}$$

Из тригонометрической формулы

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

Проекции вектора скорости центра масс приводного и деформирующего шаров на нормаль n в конце удара [8]:

$$u_{1n} = v_{cn} + K(v_{cn} - v_{1n})$$
; (29)

$$u_{2n} = v_{cn} + K(v_{cn} - v_{2n})$$
, (30)

где v<sub>cn</sub> – скорость центра масс системы,

$$\mathbf{v}_{\rm cn} = \frac{\mathbf{m}_1 \mathbf{v}_{\rm 1n} + \mathbf{m}_2 \mathbf{v}_{\rm 2n}}{\mathbf{m}_1 + \mathbf{m}_2} , \qquad (31)$$

где m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub> – массы приводного и деформирующего шаров соответственно.

Так как векторы ударного импульса направлены по общей нормали n к поверхностям соударяющихся шаров, то проекции вектора скорости центра масс приводного и деформирующего шаров на касательную τ до и после удара остаются неизменными:

$$\mathbf{v}_{1\tau} = \mathbf{u}_{1\tau} \; ; \; \mathbf{v}_{2\tau} = \mathbf{u}_{2\tau} \; , \qquad (32)$$

где  $u_{1\tau}$ ,  $u_{2\tau}$  – проекции вектора скорости центра масс приводного и деформирующего шаров на касательную  $\tau$  после удара соответственно.

Тогда

$$tg\alpha_2 = \frac{u_{1\tau}}{u_{1n}} . \tag{33}$$

Абсолютные скорости приводного и деформирующего шаров после удара:

$$u_1 = \sqrt{u_{1n}^2 + u_{1\tau}^2}$$
; (34)

$$u_2 = \sqrt{u_{2n}^2 + u_{2\tau}^2} \ . \tag{35}$$

# Заключение

В статье представлен новый способ формообразования внутренней поверхности цилиндра импульсно-ударным раскатыванием в магнитном поле. Разработана конструкция комбиниро-

ванного двухрядного магнитно-динамического инструмента для отделочноупрочняющей обработки. Получены системы дифференциальных уравнений, описывающие кинематику движения приводного шара и его взаимодействие с деформирующим шаром при совмещенной упрочняющей обработке импульсно-ударным раскатыванием И вращающимся магнитным полем. Найдены начальные и конечные условия для численного интегрирования дифференциальных уравнений и определения кинематических характеристик приводного шара при различных режимах комбинированной отделочно-упрочняющей обработки и конструктивных параметрах магнитно-динамического инструмента. Получены аналитические зависимости для определения скорости деформирующего шара в момент его взаимодействия с упрочняемой внутренней поверхностью цилиндра.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ящерицин, П. И.** Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П. И. Ящерицин, А. П. Минаков. – Минск : Наука и техника, 1989. – 215 с.

2. **Минаков, А. П.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под ред. П. И. Ящерицина. – Минск : Наука и техника, 1995. – 304 с.

3. **Чистосердов, П. С.** Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П. С. Чистосердов. – Минск : Беларусь, 1977. – 124 с.

4. **Таранов, А. С.** Упрочнение валов методом ППД в ПМП / А. С. Таранов // Тракторы и сельхозмашины. – 2003. – № 2. – С. 44–45.

5. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. 2089373 Рос. Федерации, МКИ 6 В 24 В 39 / 02 / А. М. Довгалев (РБ). – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97, Бюл. № 25. – 4 с.

6. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 Рос. Федерации, МКИ 6 В 24 В 39 / 02 / А. М. Довгалев (РБ). – № 4922542/27; заявл. 29.03.91; опубл. 10.11.96, Бюл. № 31. – 14 с.

7. Довгалев, А. М. Взаимодействие деформирующего шара с источником магнитного поля динамического раскатника / А. М. Довгалев, В. В. Глущенко, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2013 г.: в 2 ч. / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2012. – Ч. 1. – С. 33–34.

8. Лойцанский, Л. Г. Курс теоретической механики : в 2 т. / Л. Г. Лойцанский, А. И. Лурье. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1983. – Т. 2. – 640 с.

### Статья сдана в редакцию 31 декабря 2013 года

Валерий Константинович Шелег, д-р техн. наук, проф., Белорусский национальный технический университет. Тел.: 8-0172-92-74-54.

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

Александр Алексеевич Жолобов, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8 0222-23-04-51.

**Николай Андреевич Леванович,** канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-22-41-59.

Иван Анатольевич Тарадейко, студент, Белорусско-Российский университет.

Valery Konstantinovich Sheleg, DSc (Engineering), Prof., Belarusian National Technical University. Phone: 8 -0172-92-74-54.

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

Aleksandr Alekseyevich Zholobov, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-23-04-51.

Nikolai Andreyevich Levanovich, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-22-41-59.

Ivan Anatolyevich Taradeiko, student, Belarusian-Russian University.

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

## УДК 620.179-534.1

# М. В. Асадчая, А. Р. Баев, О. С. Сергеева, А. Л. Майоров

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВЫСТУПА НА ФОРМИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

## UDC 620.179-534.1

## M. V. Asadchaya, A. R. Baev, O. S. Sergeeva, A. L. Mayorov

# IMPACT OF THE TECHNOLOGICAL LEDGE PARAMETERS ON THE ACOUSTIC FIELD FORMATION OF THE CONVERTER OF SUPERFICIAL WAVES

#### Аннотация

Представлены экспериментальные данные исследования формирования в образцах с различным углом выступа  $\gamma = 0...135^{\circ}$  полей поперечной и продольной мод, первичным источником которых является преобразователь волны Рэлея, в частотном диапазоне 1...3 МГц.

Получены данные по коэффициентам прохождения поверхностных акустических волн (ПАВ) через область сопряжения контактной поверхности образца с внутренней гранью выступа и преобразования ПАВ в головную волну, являющуюся источником одной из составляющих поля поперечной моды.

Исследовано влияние высоты выступа h на прохождение через него трансформированного акустического импульса ПАВ и показана возможность обнаружения поверхностных дефектов, расположенных с обратной стороны выступа.

#### Ключевые слова:

волна Рэлея, краевая волна, сопутствующая волна, головная волна, выступ, трансформация мод, рассеяние, граничные условия, суперпозиция полей.

#### Abstract

Experimental data of the research on fields formation of the transverse and longitudinal modes, which primary source is a Rayleigh wave converter, in the frequency range of 1...3 MHz, in models with a various angle of a ledge  $\gamma = 0...135^{\circ}$  are presented.

Data on coefficients of the passage of superficial acoustic waves (SAW) through the area of interface of a contact surface of a model with an internal side of a ledge and the transformation of SAW to the head wave which is a source of one of the components of a traverse mode field are obtained.

The influence of a ledge height h on passing the transformed acoustic impulse of the superficial acoustic waves through it has been investigated and the possibility of detecting superficial defects located on a reverse side of the ledge is shown.

# Key words:

rayleigh wave, edge wave, accompanying wave, head wave, ledge, transformation of modes, dispersion, boundary conditions, superposition of fields.

# Введение

Несмотря на имеющийся обширный материал теоретических (преимущественно) и экспериментальных исследований, например [1-5], вопросы трансформации поверхностных волн и их рассеяния на выступах различной конфигурации и размеров недостаточно изучены. Наиболее близкие по теме настоящих исследований результаты получены в [6], где первичным источнислужил пьезопреобразователь ком (ПЭП) подповерхностных поперечных волн с углом призмы  $\beta = \arcsin(C_1/C_T)$ , где  $C_1$  – скорость продольной волны в призме ПЭП; С<sub>Т</sub> – скорость поперечной волны, а ПАВ играла роль лишь сопутствующей моды. При этом на особенности трансформации ее в объемные моды и рассеяния в области сопряжения контактной поверхности (ОСП) с внутренней гранью выступа не обращалось должного внимания. При проведении акустических измерений использовались образцы с прямоугольными выступами, поверхность приема которых была плоской, что давало лишь качественную картину исследуемого поля в окрестности зоны α ~ 0 и значительно искаженную – вне ее. Эти недостатки были устранены в работе, где образцы с выступом выполнены с цилиндрической поверхностью приема волн.

Используемые на практике изделия, узлы и соединения могут иметь технологические выступы с различным значением угла выступа  $\gamma$  и высоты h, а потенциально опасные дефекты располагаться не только в объеме выступа, но и за ним – в недоступной зоне. С другой стороны, изучаемые объекты – это волноводы сложной геометрии, и знание особенностей возбуждения и прохождения через них различных упругих мод представляет интерес для создания устройств для приема и излучения упругих мод. Поэтому дальнейшее проведение исследований механизма трансформации и полей рассеяния объемных мод.

первичным источником которых является ПЭП волны Рэлея, актуально не только для ультразвукового контроля указанных объектов на наличие дефектов, но и для других целей в технике ультразвуковых измерений.

Был выбран экспериментальный путь исследований, т. к. теоретический подход для описания рассматриваемых объектов ограничен ввиду сложности постановки граничных условий и др., а также продолжено изучение особенностей формирования поля поперечных (преимущественно)  $A_T(\alpha)$  и продольных  $A_L(\alpha)$  волн в стальных образцах. Исследуются зависимости параметров поля от угла выступа  $\gamma$  и его высоты h, определяются коэффициенты прохождения и трансформации упругих мод на ОСП выступа.

Как будет показано ниже, акустическое поле  $A_T(\alpha)$  может быть представлено в виде суперпозиции полей трех источников: A<sub>TS</sub> – поле сопутствующей поперечной волны, излучаемой преобразователем одновременно с волной Рэлея; A<sub>TE</sub> – поле краевой поперечной волны, трансформированной из ПАВ на ОСП;  $A_T^*$  – поле отходящей под углом 33° к нормали внутренней грани выступа поперечной волны, генерируемой краевой головной волной. На основе экспериментальных данных и проведенного их анализа рассматриваются некоторые пути использования полученных результатов в ультразвуковом контроле и технике ультразвуковых измерений.

# Результаты экспериментальных исследований

Методика исследований. В качестве источника и приемника электрических сигналов используются блоки стандартного дефектоскопа. Анализ параметров недетектированного сигнала осуществляется на базе компьютера и с применением прибора И1-8. В качестве излучателей используются наклонные

ПЭП с углом призмы  $\beta_{\Pi AB} = 64^{\circ}$  и диаметром пьезоэлемента 2a = 12 мм, рабочие частоты f = 1...3 МГц. Колебания, тангенциальные поверхности объекта, принимаются ЭМА-преобразователем с шириной намотки провода 0,8 мм и нормальным полем, создаваемым постоянным самарий-кобальтовым магнитом; нормальные поверхности объекта колебания – прямым ПЭП с поперечным размером пьезоэлемента 1 мм и магнитным прижимом. При исследовании отношения амплитуды ПАВ к амплитуде сопутствующей поперечной волны A<sub>ПАВ</sub>/A<sub>TS</sub> в качестве излучателя используется ПЭП с переменным углом призмы β и постоянной точкой выхода акустического луча. Объектом исследования являются: стальные цилиндрические образцы радиусом  $R_{\rm O} = 54$  мм с различной величиной вырезанного углового сектора у, варьируемого в диапазоне  $\gamma = 35...135^{\circ}$ ; образцы в виде параллелепипеда с варьируемой высотой выступа h = 1...5 мм.

Основные результаты исследований представлены на рис. 1...5, иллюстрирующих характер изменения поля рассеяния объемных мод и коэффициентов прохождения и трансформации ПАВ в продольные и поперечные моды в зависимости от угла выступа, его высоты и частоты волны.

Влияние угла выступа. Рассмотрим особенности формирования результирующих полей  $A_T(\alpha)$  и  $A_L(\alpha)$  в объеме образцов с различным углом выступа. В отсутствие радиусного перехода  $(R_{\lambda} = R/\lambda_{\Pi AB} = 0,$  где R – радиус ОСП; λ<sub>ПАВ</sub> – длина ПАВ) можно считать, что излучение краевых волн производится источником (мнимым) с амплитудными и фазовыми параметрами, распределенными в объеме радиусом  $\sim \lambda_{\Pi AB}$ , и центром в координате x = z = 0. Отличие рассматриваемого источника упругих волн от известных (малоапертурных) [8] заключается в своеобразии граничных условий, обуславливающих механизм трансформации мод и асимметрию формируемых полей.

Прежде всего, обратим внимание на то, что зависимости  $A_T(\alpha)$  имеют в окрестности  $\alpha \sim 0^\circ$  максимум (см. рис. 1 и 2), и с уменьшением  $\gamma$  наблюдается тенденция сдвига его (на ~5...7°) в область положительных значений  $\alpha$ , что детализировано на рис. 1, б. При этом изменение абсолютной амплитуды максимума поля на фиксированной рабочей частоте не превосходит 2...3 дБ.

Независимо от частоты волны и угла выступа зависимости  $A_T(\alpha)$  имеют ярко выраженный локальный минимум, достигающий для  $\gamma \leq 90^\circ$  десятки децибел в окрестности характерного угла  $\alpha_{\min}$ . Для  $\gamma = 90^\circ$  этот экстремум возникает в результате взаимодействия рассеянной на выступе краевой  $T_E$ -моды и отходящей под углом 33° к нормали поверхности передней грани выступа поперечной  $T^*$ -моды. Последняя генерируется краевой головной волной, трансформированной из ПАВ.

Экспериментально установлено (см. рис. 1), что α<sub>min</sub> представляет собой линейную функцию от γ:

$$\alpha_{\min} = \Xi - \gamma, \qquad (1)$$

где Ξ – некоторая константа, зависящая от частоты.

Для  $\gamma \leq 90^{\circ}$  при варьировании частоты от 1 до 3 МГц  $\Xi$  изменяется в диапазоне 132...137° при погрешности угловых измерений не больше 1°.

Используя представления лучевой акустики, получим обобщенное выражение для определения значений углов приема, при которых должны наблюдаться локальные экстремумы поля, включая  $\alpha_{\min}$ . Условием экстремума является сдвиг фаз между  $T_E$ - и  $T^*$ -модами в точке приема, равный  $\Delta \varphi = m\pi$ , где m – целое отрицательное число. При расчете значения  $\alpha_{\min}$  (и положений других локальных экстремумов) используется формула (1), в которой





Рис. 1. Влияние угла выступа на нормализованную амплитуду поля поперечной моды в объеме выступа при  $R_{\lambda} \ll 1$ : а –  $\gamma = 35^{\circ}$  (1); 60° (2); 90° (3);  $A_T = \cos \alpha$  (4); б – детализированная картина поля в области максимума:  $\gamma = 90^{\circ}$  (1); 35° (2); 135° (3)



Рис. 2. Нормализованная амплитуда поля поперечной волны в образце с  $\gamma = 35^{\circ}$ ,  $R_{\lambda} << 1$ : f = 1 МГц (1); 1,8 МГц (2); 3 МГц (3)

Как непосредственно следует из (1) и (2), при  $\chi \ll 1$  величина  $\alpha_{\min} \rightarrow 123^{\circ} - \gamma$ , т. е. принимает минимальное значение. И, наоборот, увеличение  $\chi$  сопровождается ростом  $\alpha_{\min}$ , что согласуется с данными эксперимента.

Отметим неплохое совпадение расчетных и экспериментальных данных (в пределах ±1,5°) при значении m = -1 и полученных в предположении более раннего прихода Т\*-моды в точку приема с временным сдвигом, равным половине периода волны. Экстремумам же с номерами m < -1 ( $\alpha > \alpha_{\min}$ ) соответствуют быстро затухающие осцилляции кривой  $A_T(\alpha)$ , двойной размах амплитуды которых не превосходит 2...3 дБ. Если же угол выступа тупой  $(\gamma = 135^\circ)$ , то, как следует из экспериментальной кривой (см. рис. 1, б), влияние Т\*-моды на формируемое поле «окализовано» в окрестности а ~ 0, причем α<sub>min</sub> ≈ -(12...13°), что согласуется с расчетным значением. В силу дополнительного влияния сопутствующей моды, значимой по величине, оценить амплитуду Т\*-моды затруднительно.

Тем не менее очевидно, что при проведении ультразвукового контроля или измерений ( $\gamma > 90^{\circ}$ ) пренебрегать влиянием отходящей поперечной моды недопустимо. С другой стороны, в некоторых случаях снижение ее влияния может быть достигнуто путем уменьшения угла выступа или модификации поверхности внутренней грани выступа.

Необходимо отметить, что поле *Т\**-моды преимущественно зависит от пространственного распределения и силы его источников (мнимых) на поверхности передней грани выступа, определяемых амплитудой и законом ослабления головной волны, от длительности импульса, а также частоты волны и геометрии объекта, описываемых безразмерным параметром  $\chi$ . Так как головная волна является источником Т\*-моды, то была исследована зависимость ее амплитуды  $A_L^*$  от  $\gamma$ . Как установлено (рис. 3), нормализованная зависимость  $\widetilde{A}_{L}^{*}(\gamma)$  имеет максимум, если угол выступа  $\gamma = 90^\circ$ .



Рис. 3. Влияние угла выступа на параметры ПАВ и возбуждаемых краевых волн при  $R_{\lambda} \le 1$ : 1 – коэффициент прохождения ПАВ через ОСП выступа по амплитуде ( $D_{IAB}$ )<sub>4</sub>; 2 – коэффициент трансформации ПАВ в краевые моды по энергии ( $K_{IAB/E}$ )<sub>6</sub>; 3 – нормализованная амплитуда головной (поверхностной) волны  $\widetilde{A}_{I}^{*}$ 

На основании хода зависимостей  $A_T(\alpha)$  в окрестности локального минимума можно оценить вклад в результирующее поле отходящей Т\*-моды. При этом учитывается тот факт, что при α → α<sub>min</sub> в точке приема  $A_T \approx A_{TE} - A_T \cdot \vec{k} \vec{R}_O / k R_O$ , где k – волновой вектор, а угол падения Т\*-моды на поверхность приема ~ 14...16°, где конкретное значение  $A_{TE}$ получено путем интерполяции зависимости  $A_T(\alpha)$  в окрестности  $\alpha_{\min}$ . Как расчеты, показывают элементарные наибольшее изменение амплитуды результирующего поля под влиянием отходящей моды также достигается, когда исследуемый образец имеет угол выступа  $\gamma = 90^{\circ}$ . Так, например, для f = 1,8 МГц амплитуда  $T^*$ -моды в окрестности а<sub>min</sub> всего на 8...10 дБ меньше амплитуды максимума исследуемой функции. При значениях у, отличных от 90°, влияние отходящей моды на результирующее поле ослабевает.

Другая важная особенность в поведении формируемого поля поперечной моды заключается в том, что при  $\gamma \leq 90^{\circ}$  и f = const в угловом диапазоне  $0 \leq \alpha < \alpha_{\min} - \Delta \alpha$  нормализованная зависимость  $\widetilde{A}_T(\alpha)$  с погрешностью не более 1...2 дБ может быть аппроксимирована квазилинейной логарифмической функцией

$$\widetilde{A}_T(\alpha) = 20 \lg(A_T / A_T^{\max}) = 1 - c\alpha, \quad (3)$$

где c – подобранный постоянный коэффициент, для f = 1,8 МГц  $c \approx 0,15$  дБ/град,  $\Delta \alpha$  соответствует периоду осцилляции функции в окрестности ее минимума.

Что касается поля в области  $\alpha < 10^{\circ}$ , где наиболее существенно проявляются интерференционные процессы, то оно весьма чувствительно к положению ПЭП относительно выступа, что приводит к изменению амплитуды и фазового сдвига между сопутствующей и краевой модами, сопровождающемуся сдвигом экстремумов результирующего поля.

На рис. 3 представлены данные о коэффициенте прохождения ПАВ через ОСП выступа с разным значением у. Установлено, что коэффициент прохождения ПАВ через ОСП выступа уменьшается на величину ~12 дБ в диапазоне варьирования у от 180° (плоская поверхность) до 35°. При этом коэффициент преобразования энергии ПАВ в краевые объемные моды в указанном диапазоне  $\gamma$  возрастает на ~ 90 %, а максимум зависимости  $A_T(\alpha)$  изменяется не более чем на 2...3 дБ, т. е. дополнительная энергия краевых волн рассеивается по всему объему выступа образца. В то же время ширина верхней части (от максимума) поля излучения поперечной моды  $A_T(\alpha)$ , измеренная на уровне 6 дБ, в образцах с  $\gamma \leq 90^{\circ}$  изменяется не более чем на 2...4°.

Волновой фронт продольной моды в исследуемой области образца имеет структуру, существенно отличающуюся от той, что формируется поперечной модой. Характерные изменения нормализованной амплитуды поля краевой продольной моды  $\widetilde{A}_{I}(\alpha)$ , трансформированной и рассеянной на выступе, в зависимости от угла выступа у приведены на рис. 4. Как и следовало ожидать, уменьшение угла выступа сопровождается существенным расширением исследуемого поля, а также увеличением концентрации энергии в области  $\alpha > 0^{\circ}$ . Отличительная особенность этих зависимостей заключается в наличии выраженного минимума, лежащего несколько ниже  $\alpha = 0^{\circ}$ , и двух максимумов, наибольший из которых расположен в области  $\alpha > 0^{\circ}$ . Смещение глобального максимума в область  $\alpha > 0^{\circ}$  с ростом  $\gamma$ достигает 40...50°, а соотношение между этим максимумом и минимумом поля составляет 6...10 дБ.



Рис. 4. Влияние угла выступа на нормализованную амплитуду поля продольной волны в объеме выступа при  $R_{\lambda} \ll 1$ :  $\gamma = 35^{\circ}$  (1); 90° (2); 135° (3)

Важно отметить, что амплитуда поперечной моды, оцененная экспериментально, в окрестности  $\alpha \sim 0$  практически на порядок больше продольной волны, однако эта разница нивелируется при отклонении  $\alpha$  от нулевого значения. Тем не менее, ввиду существенной разницы скоростей между поперечной и продольной модами, представляется возможным их совместное использование при контроле физико-механических свойств материалов.

Применение ПЭП волны Рэлея для контроля объектов с технологическими выступами трансформированной ИЗ ПАВ поперечной волной перспективно в том случае, когда дефект лежит в области углов  $\alpha \approx 0^{\circ}$  или выше. При этом прозвучивание объекта может производиться в совмещенном или раздельном режиме, используя традиционные схемы - «тандем» или «дуэт». В последнем случае при  $R_{\lambda} << 1$  угол между плоскостями падения ПЭП следует выбирать не более 80...100°, чтобы не допустить значительных потерь энергии волны на отражение. Такие преобразователи могут быть использованы для контроля объектов с положительной и отрицательной кривизной. В ряде же случаев – при расширении угловой области, в которой могут быть обнаружены дефекты, – они могут быть применены совместно с ПЭП подповерхностных поперечных волн.

Влияние высоты выступа на трансформацию и прохождение ПАВ. В ряде случаев поверхностные дефекты могут быть расположены в труднодоступной области, лежащей за выступом, что существенно затрудняет их выявление традиционными методами. Проанализируем возможности выявления таких дефектов в эхо-режиме с помощью преобразователей волны Рэлея, реализующих два варианта прозвучивания объекта с выступом высотой *h*. В первом варианте выявление дефекта осуществляется согласно схеме: ПАВ  $\rightarrow$  *T*-мода  $\rightarrow$ ПАВ  $\rightarrow$  ДЕФЕКТ  $\rightarrow$  ПАВ  $\rightarrow$  *T*-мода  $\rightarrow$ ПАВ. Во втором варианте используется ПАВ, которая огибает выступ. Пусть амплитуды отраженного от дефекта сигнала в указанных случаях  $A_1$  и  $A_2$  соответственно; К<sub>1</sub> и К<sub>2</sub> – коэффициенты трансформации по амплитуде ПАВ в

Т-моду и обратно на ОСП выступа; F<sub>1</sub> – функция ослабления Т-моды в области расположения выступа;  $\mathcal{R}_{\partial}$  – коэффициент отражения ПАВ от дефекта; *D*<sub>1</sub> и *D*<sub>2</sub> – коэффициенты прохождения ПАВ по амплитуде через ребра граней прямоугольного выступа, а F<sub>2</sub> – функция ослабления ПАВ, распространяющейся по наружной поверхности выступа. Опуская множители, характеризующие распространение ПАВ вне выступа, а также пренебрегая полем сопутствующей моды, амплитуда сигнала, отраженного от дефекта (за выступом) и пришедшего на приемный ПЭП согласно указанным вариантам прозвучивания, примет вид:

$$A_1 \sim K_1^2 K_2^2 F_1^2 \mathcal{R}_{\partial} = Y_1^2 \mathcal{R}_{\partial};$$
  

$$A_2 \sim D_1^2 D_2^2 F_2^2 \mathcal{R}_{\partial} = Y_2^2 \mathcal{R}_{\partial}, \qquad (4)$$

где  $Y_1 = K_1 K_2 F_1$ ;  $Y_2 = D_1 D_2 F_2$ .

На рис. 5 представлены данные эксперимента, позволяющие на конкретном примере оценить потери энергии волны при прозвучивании объекта с выступом как в теневом, так и в эхорежиме и выявить возможности использования эффекта трансформации мод для обнаружения поверхностных дефектов. Как видно, ход зависимостей A<sub>1</sub> и A<sub>2</sub> при увеличении высоты выступа противоположен, так что при некотором значении  $h_{\lambda} = h/\lambda_{\Pi AB} > h_{\lambda}^*$  трансформируемый в процессе прохождения акустический сигнал будет превалировать по амнетрансформированной плитуде над ПАВ. Амплитуда дважды трансформированного на выступе сигнала  $A_1$  является возрастающей функцией  $h_{\lambda}$ , выходящей на насыщение уже при значении  $h_{\lambda} \approx 3$ , для которого измеренное соотношение амплитуд  $20lg(A_2/A_1) \approx -24$  дБ, а  $20lg(A_1/A_0) \approx -10,5$  дБ, где  $A_0$  – амплитуда опорного сигнала ПАВ, измеренного на той же акустической базе в отсутствие выступа, т. е. при работе в эхорежиме потери на 4-кратную трансформацию мод составят ~21 дБ. Очевидно, что уменьшение длины выступа приведет к росту амплитуды сигнала вследствие снижения потерь энергии, вызванных расхождением сигнала.



Рис. 5. Прохождение волны Рэлея через участок с прямоугольным выступом разной высоты: 1 – амплитуда нетрансформированной волны  $A_2$ ; 2 – амплитуда трансформированной на выступе волны  $A_1$ ; 3, 4 – отношение амплитуд  $A_2/A_1$ ; частота f = 0.985 МГц ( $\circ, \Delta, \Box$ ); 1,72 МГц ( $\bullet, \Delta, \bullet$ )

Предварительные исследования, проведенные в условиях, когда искусственные дефекты расположены за выступом, показали принципиальную возможность их обнаружения указанным методом. При этом для снижения уровня помех наиболее предпочтительными являются раздельные схемы прозвучивания объекта, включая «тандем» и «дуэт». Несомненно, что при дистанционном зондировании объекта, реализующем преимущества использования преобразователей ПАВ, необходимо учитывать влияние состояния поверхности на ослабление рэлеевских волн.

# Выводы

Изучены закономерности формирования акустического поля трансформированных и рассеянных на выступе объемных волн, первичным источником которых является преобразователь волны Рэлея, и установлено следующее:

– результирующее поле поперечных волн  $A_I(\alpha)$  имеет максимум, расположенный в окрестности продолжения контактной поверхности образца ( $\alpha \sim 0^{\circ}$ ), смещающийся на 5...7° при варьировании угла выступа  $\gamma$  в диапазоне 35...135°, а также ярко выраженный локальный минимум, возникающий в результате интерференции как рассеянных на угле выступа, так и отходящих от его внутренней грани поперечных волн; причем источником последних, как показано, является энергия подповерхностных продольных (головных) волн, трансформированных из ПАВ; установлено, что координата локального минимума  $\alpha_{min}$  линейно зависит от  $\gamma$ , а расхождение расчетных и опытных данных не превышает 1...1,5°;

– нормализованные зависимости поля поперечной моды  $A_I(\alpha)$  в диапазоне  $0^{\circ} < \alpha < \alpha_{\min}$  могут быть аппроксимированы убывающей линейнологарифмической функцией с углом наклона, не зависящим от  $\gamma$ ;

– в исследованном диапазоне углов выступа  $\gamma$  структура поля продольной моды  $A_L(\alpha)$  имеет существенное отличие от поля поперечной моды, заключающееся в наличии двух ярко выраженных максимумов и минимума поля, лежащего в области углов  $\alpha_{\min} = -(10...20)^\circ$ , при этом уменьшение угла выступа  $\gamma$  сопровождается существенным расширением поля;

– получены зависимости коэффициентов прохождения ПАВ через выступ от его высоты, определено соотношение амплитуд чисто поверхностной и дважды трансформированной мод и рассмотрена возможность использования последней для обнаружения поверхностных дефектов, лежащих за высоким выступом; результаты настоящих исследований могут быть применены для контроля объектов с технологическими выступами, измерения акустических свойств материалов и создания преобразователей поперечных мод.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Викторов, И. А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах / И. А. Викторов. – М.: Наука, 1981. – 288 с.

2. Поверхностные акустические волны в неоднородных средах / С. В. Бирюков [и др.]. – М. : Наука, 1991. – 415 с.

3. **Гурвич, А. К.** Ультразвуковой контроль сварных швов / А. К. Гурвич. – Киев : Техніка, 1972. – 460 с.

4. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. Т. 3 : Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге ; под ред. чл.-кор. РАН В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – 832 с.

5. Данилов, В. Н. Исследование рассеяния поперечной волны на трещине / В. Н. Данилов, И. Н. Ермолов, С. В. Ушаков // Дефектоскопия. – 2001. – № 5. – С. 42–50.

6. **Баев, А. Р.** Особенности возбуждения и распространения продольных и поперечных подповерхностных волн в твердых телах / А. Р. Баев, М. В. Асадчая // Дефектоскопия. – 2005. – № 9. – С. 19–43.

7. Акустические поля малоапертурных преобразователей. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы / А. М. Люткевич [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 3–8.

8. Аббакумов, К. Е. Влияние нарушения акустического контакта на распространение волн Стоунли вблизи границы твердых полупространств / К. Е. Аббакумов, Р. С. Коновалов // Дефектоскопия. – 2008. – № 3. – С. 52–58.

Статья сдана в редакцию 12 декабря 2013 года

**Мария Вадимовна Асадчая,** канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт прикладной физики НАН Беларуси. Тел.: 8-017-331-63-41.

**Алексей Романович Баев,** д-р техн. наук, проф., Институт прикладной физики НАН Беларуси. E-mail: baev@iaph.bas-net.by.

Ольга Сергеевна Сергеева, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-22-52-12.

**Александр Леонидович Майоров,** канд. техн. наук, Институт прикладной физики НАН Беларуси. Тел.: 8-017-284-20-02.

Mariya Vadimovna Asadchaya, PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. Phone: 8-017-331-63-41.

Aleksey Romanovich Baev, DSc (Engineering), Prof., Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: baev@iaph.bas-net.by.

Olga Sergeevna Sergeeva, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-22-52-12.

**Aleksandr Leonidovich Mayorov,** PhD (Engineering), Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. Phone: 8-017-284-20-02.

## УДК 620.179.14

# А. В. Кушнер, В. А. Новиков

# АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ДЕФЕКТОВ В ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАССЕЯНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

# UDC 620.179.14

### A. V. Kushner, V. A. Novikov

# THE ANALYSIS OF MODELS OF DEFECTS THROUGH THEORETICAL RESEARCH OF MAGNETIC STRAY FIELDS ARISING DURING FERROMAGNETIC OBJECTS MAGNETIZATION

#### Аннотация

Проанализированы модели дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов. Дан сравнительный анализ результатов расчетов полей рассеяния дефектов для различных моделей.

#### Ключевые слова:

магнитный контроль, модели дефектов сплошности, теоретические исследования, поля рассеяния дефектов.

#### Abstract

Models of defects have been analyzed in the theoretical research of magnetic stray fields arising during the magnetization of ferromagnetic objects. The comparative analysis of calculations of stray fields of defects for different models is presented.

#### Key words:

magnetic control, models of integrity defects, theoretical research, stray fields of defects.

С целью оптимизации условий магнитного контроля ферромагнитных объектов произведем анализ моделей дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов.

В. К. Аркадьев впервые предложил магнитное поле рассеяния, создаваемое поверхностной трещиной, рассматривать как поле, образованное двумя разноименными линейными «магнитными зарядами», имеющими равномерную линейную плотность и расположенными в углах выхода трещины на поверхности объекта [1]. Такая модель хорошо передает структуру поля рассеяния на расстояниях не менее трехкратного значения раскрытия дефекта. Однако при расчете ближних полей у боковых граней дефекта нормальная составляющая поля несплошности обращается в бесконечно большую величину. Данная методика позволяет учесть только один параметр дефекта – ширину его раскрытия.

В [2] проведен расчет магнитного поля объекта, состоящего из двух сред с различными магнитными проницаемостями. Поверхность раздела сред представляет собой две полуплоскости, образующие двугранный угол. Магнитное

© Кушнер А. В., Новиков В. А., 2014

поле создается током, текущим по прямолинейному проводнику в пространстве параллельно ребру границы раздела сред. Расчет производится для случая постоянной магнитной проницаемости сред. При этом автор отмечает, что для конечных проницаемостей при использовании метода конформных преобразований задача не может быть решена точно.

Н. П. Большаковым получено аналитическое выражение для тангенциальной составляющей поля рассеяния дефекта, имеющего полуцилиндрический профиль, в точке над его центром [3]. Дефект находится в ферромагнитном полупространстве. Объект намагничивается внешним однородным полем, направленным параллельно поверхности. За источник вторичного поля в этом случае приняты поверхностные «поляризационные заряды», распределенные по закону косинуса.

А. Б. Сапожниковым получены выражения для скалярного потенциала, определяющего компоненты напряженности магнитостатического поля включений в виде бесконечно вытянутых эллиптического и кругового цилиндров при условии, что объект намагничен таким по величине полем, что магнитная проницаемость среды постоянна. Исследованы зависимости величины поля рассеяния дефекта от степени раскрытия и глубины залегания дефекта [4].

С целью проведения магнитного контроля качества объемной или поверхностной закалки массивных стальных изделий последние зачастую подвергают локальному намагничиванию при помощи приставных электромагнитов. В этом случае распределение индукции в толще изделия, а следовательно, величина и распределение поля остаточной намагниченности определенным образом связаны с магнитной индукцией в полюсе электромагнита, с магнитными свойствами испытуемого участка изделия и с геометрическими полюсов электромагнита. размерами

Поэтому в [5] был проведен расчет распределения индукции в массивном стальном изделии при локальном его намагничивании с помощью приставного электромагнита. Было установлено, что поле остаточной намагниченности открытого полюса так же, как и индукция в неограниченном ферромагнитном полупространстве, с достаточной для практики точностью описывается формулами, полученными в предположении постоянства поверхностной плотности «магнитных зарядов». Это позволяет проводить расчет как геометрических размеров намагничивающих устройств, так и основных параметров регистриустройства для контроля рующего структуры и твердости стальных изделий по измерениям поля остаточной намагниченности. Но при этом распределение остаточной индукции в изделии не описывается количественно с такой же степенью точности. Экспериментально установлено, что нижней границей индукции для определения глубины промагничивания стального изделия следует считать индукцию  $B_{\min} \approx 0.6$  Тл. Регулирование глубины промагничивания стального изделия может быть осуществлено как путем соответствующего выбора геометрических размеров полюса электромагнита, так и путем изменения средней индукции в полюсе.

Для расчета полей рассеяния дефектов полуэллиптического и полукругового профилей рассмотрена безграничная ферромагнитная среда с дефектом в виде бесконечно длинного цилиндра, намагниченная однородным магнитным полем, направленным перпендикулярно образующей цилиндра [6]. Расчет поля рассеяния, обусловленного немагнитным включением, произведен посредством решения уравнения Лапласа при условии, что источником вторичного поля являются поверхностные поляризационные «заряды», распределенные по поверхности инородного включения по закону косинуса. В этом случае такое включение можно рассматривать как заряженный слой с эллиптическим профилем, находящимся в среде с постоянной магнитной проницаемостью. В [7, 8] считается, что если не учитывать перераспределение «поляризационных зарядов» на поверхности дефекта и объекта, то все положения для цилиндрического включения будут справедливы и для полуцилиндрических поверхностных дефектов.

Ф. Фёрстером выполнен расчет поля рассеяния поверхностных трещин конечной и бесконечной глубины, находящихся в полубесконечном ферромагнитном объекте, для линейного случая  $(\mu = \text{const})$  [9–11]. Расчет поля рассеяния бесконечно глубокой трещины в ферромагнитном материале с очень большой магнитной проницаемостью получен методом конформного преобразования. При этом напряженность магнитного поля описывается не в явной форме, как функция преобразованных координат, а получается посредством цифровых методов из исходных координат. Как отмечает автор, из расчетов легко выводятся приближенные формулы для бесконечно глубокой трещины, а из них – простые расчетные формулы для полей рассеяния трещин конечной глубины и заданной ширины.

Рассмотренные математические модели поверхностных дефектов имеют существенный недостаток: для сравнения результатов расчета и эксперимента расчетные кривые должны быть приведены к эксперименту путем приравнивания значений в точке над центром дефекта для каждого типа дефекта при изменении любого параметра несплошности, а также при каждом изменении намагничивающего поля. Кроме того, при увеличении намагничивающего поля растет несоответствие расчетных значений полей рассеяния дефектов с результатами экспериментов. В случае выхода дефекта на поверхность объекта возрастает расхождение результатов расчета и эксперимента, так как расчетное значение нормальной составляющей поля над гранью дефекта, перпендикулярного поверхности объекта, стремится к бесконечности.

В [12, 13] методом «магнитных зарядов» рассчитано поле двух щелей, расположенных симметрично относительно оси, перпендикулярной поверхности пластины. Расчет выполнен для случая, когда дефекты расположены параллельно поверхностям пластины и имеют клинообразные окончания. Объект намагничивается однородным постоянным полем перпендикулярно его поверхности. Принято допущение, что «магнитные заряды» равномерно распределены по всем граням дефектов, а их наличие на поверхности пластины не учитывается. В результате расчета было установлено, что *H<sub>x</sub>* имеет экстремальные значения на краях дефектов, а ее характер и положения экстремумов существенно не меняются при изменении параметров несплошностей. которые влияют только на величину их поля рассеяния. Расстояние между экстремумами зависит лишь от расстояния между дефектами.

Разработана методика определения диаметра литого ядра точечных сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой.

В [14, 15] предложено использовать модели дефектов с закругленными углами или модели с пакетным распределением поверхностных «поляризационных зарядов». В [14] произведен расчет поля рассеяния дефекта, аппроксимированного двумя гранями конечных размеров, «заряженных» до некоторого значения поверхностной плотности  $\sigma$ . Установлено, что величина поля рассеяния дефекта зависит от его протяженности *l* в определенном диапазоне линейным образом. В плоскости, перпендикулярной граням в центре дефекта, поле рассеяния дефекта при малых *l* пропорционально его длине, а при больших – стремится к своему предельному значению тем быстрее, чем меньше глубина дефекта *h* (при фиксированной ширине 2b). При слабых намагничивающих полях кривые  $H_x(l)$  и  $H_y(l)$ быстрее приближаются к своему предельному значению,  $H(l \rightarrow \infty)$ , чем при сильных  $H_0$ . Установлено, что распределение поля рассеяния дефекта конечной протяженности слабо зависит от l, а также незначительно изменяется вдоль его длины и только при z > l это изменение становится интенсивным.

Дальнейшим развитием задачи исследования полей рассеяния дефектов является работа [15]. В ней приведены расчетные формулы полей рассеяния дефектов в форме прямоугольного параллелепипеда конечной длины, клина, цилиндра эллиптического и кругового профилей, полуэллипсоида и полушара. Это дает возможность произвести расчет и выполнить сравнение распределения полей рассеяния дефектов различной формы.

Модель дефекта в виде ленточного диполя [7] позволяет объяснить многие закономерности в поведении поля рассеяния дефекта, однако она оказывается неудовлетворительной при описании распределения поля рассеяния дефекта в непосредственной близости от поверхности изделия. Для исключения данного недостатка в [16] рассмотрена усовершенствованная модель ленточного диполя, в которой учтено образование «зарядов» не только на гранях дефекта, но и на поверхности контролируемого объекта в окрестностях дефекта. Чтобы учесть различную плотность «магнитных зарядов», была применена пакетная модель, которая заключается в том, что участок, на котором учитываются «магнитные заряды», разбивают на несколько интервалов, имеющих различную плотность «зарядов». При этом было получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

Сложность расчета поля «пакетной» модели состоит в том, что для определения размеров «пакетов» в зависимости от параметров дефекта приходится решать трансцендентные уравнения и фактически для каждого дефекта проводить подбор размера «пакета» по данным эксперимента [16].

В [17] действие объемных «поляризационных зарядов» учитывается заменой их на расчетные «заряды», сосредоточенные на линиях, расположенных на некотором расстоянии от поляризационных плоскостей. Таким образом, расчет сводится к вычислению поля. создаваемого двумя линейными полюсами, расположенными на некотором расстоянии от поляризованных плоскостей. Исследования показали, что полученные в [17] выражения для расчета магнитостатического поля трещины позволяют с достаточной степенью точности провести количественное исследование всех характеристик поля как вблизи выхода трещины, так и вдали от нее в образцах с учетом их магнитных характеристик и размеров трещин.

Следует также отметить, что для нахождения аналитической связи между параметрами полей рассеяния дефектов, магнитными характеристиками материала изделия и размерами дефекта необходимо учитывать, кроме краевого эффекта, нелинейность магнитной проницаемости и магнитных свойств материалов [19]. Такой метод количественного расчета создаст возможности для идентификации дефектов по величине полей рассеяния и их распределения.

В ряде теоретических и экспериментальных работ отмечено, что при изменении в определенном диапазоне глубины дефекта постоянного раскрытия магнитное поле рассеяния дефекта практически остается неизменным, хотя расчетные формулы устанавливают его пропорциональную зависимость от глубины [20–22]. Это объясняется тем, что при намагничивании магнитный поток, обусловленный внешним полем, разветвляется на два: одна часть участвует в формировании поля рассеяния дефекта, другая – огибает дефект.

В [23] показано, что магнитное поле рассеяния дефекта эквивалентно

полю, которое создавало бы ферромагнитное тело, имеющее размеры дефекта, расположенное в вакууме и намагниченное в противоположном направлении. В этом случае при расчете магнитных полей рассеяния дефектов можно пользоваться (формально) выражениями, полученными для ферромагнитных тел, имеющих те же размеры, что и дефект, в том числе выражениями для коэффициентов размагничивания ферромагнитных тел заданной формы.

В связи с широким использованием ЭВМ получены математические модели, которые количественно описывают поля рассеяния с учетом параметров дефектов и магнитных свойств контролируемого объекта, что позволяет решить обратную задачу [15, 24–28].

В [29] Г. Добманом проведен критический обзор аналитических исследований полей поверхностных дефектов. Предложено поле рассеяния поверхностных дефектов описывать посредством интегральных уравнений, решаемых методом последовательных приближений. Этот подход известен как метол Г. А. Гринберга [30]. В [31] определены основные закономерности распределения магнитного поля рассеяния дефекта в виде бесконечно длинного прямоугольного паза, расположенного на поверхности ферромагнитного полупространства, при намагничивании нормально поверхности. Согласно результатам расчета при увеличении глубины лефекта поле его рассеяния остается постоянным. На самом деле величина поля рассеяния, обусловленного дефектом, должна уменьшаться вследствие удаления дна дефекта.

Основой модели в [32] являются предложенные в [17] уравнения составляющих поля вблизи поверхностного дефекта, грани которого нормальны поверхности. Такой подход дает возможность решать задачи практической дефектоскопии с применением ЭВМ в реальном времени в условиях помех и неточных измерений. Приведенные алгоритмы при небольшой модификации позволяют получать оценки параметров сколь угодно большого числа дефектов в одном протяженном объекте.

На основе анализа обширного экспериментального материала по результатам исследований полей рассеяния, создаваемых дефектами, в [33] предложена модель поля протяженного поверхностного дефекта прямоугольного профиля в виде системы двух углубленных линейных «магнитных зарядов». Согласно принятой модели расположение «зарядов» на поверхностях граней дефектов зависит от параметров дефекта. В работе установлены функциональные зависимости распределения «магнитных зарядов» от параметров дефекта магнитных характеристик среды. И Проведено сравнение результатов эксперимента и расчетов для ряда широко известных математических моделей полей рассеяния поверхностных дефектов (модель В. К. Аркадьева, модель Н. Н. Зацепина – В. Е. Щербинина, модель с «зарядами», распределенными по линейному закону, и модель углубленных «зарядов» для группы дефектов). Выявлено, что самое близкое количественное и качественное соответствие с экспериментом дает расчет поля для модели «углубленных зарядов».

В [34] для учета влияния нелинейных свойств ферромагнитной среды на поле поверхностного дефекта использован метод последовательных приближений. В качестве исходных взяты формулы из [7, 11]. Установлено, что полученные выражения хорошо описывают поля только узких поверхностных дефектов, ширина которых составляет десятые и сотые доли миллиметра. Показано, что существенный вклад в поле поверхностных дефектов вносят «объемные заряды».

В [35] предложена модель магнитного поля рассеяния дефекта в виде бесконечно тонкого соленоида прямоугольного сечения, длина которого равна ширине дефекта, а высота – его глубине. Принято допущение, что по обмотке соленоида протекает ток, плотность которого равна нормальной составляющей намагниченности ферромагнетика, в котором находится данный дефект. Модель является универсальной, что подтверждают результаты расчетов, полученных ранее Н. Н. Зацепиным, В. Е. Щербининым, Ф. Фёрстером.

На основе учета размагничивающего фактора дефекта в [36] получено аналитическое выражение для количественной оценки поверхностной плотности «магнитных зарядов», возникающих на гранях дефектов при тангенциальном намагничивании ферромагнитного изделия, а также уточненные расчетные соотношения, описывающие распределение магнитного поля рассеяния дефекта конечной глубины.

В [37] проведен самосогласованный расчет плотности «поверхностных зарядов» на гранях поверхностного дефекта. Показано, что в общем случае модель дефекта с постоянной плотностью «зарядов» возможна лишь для нелинейной ферромагнитной среды. Наличие объемных «зарядов» влечет за собой существенное изменение поверхностных «зарядов». Поле объемных «зарядов» вблизи дефекта направлено в ту же сторону, что и внешнее намагничивающее поле, возрастая с приближением ко дну дефекта, что приводит к возрастанию величины поверхностных «зарядов» и однородному их распределению. Из-за существенной взаимосвязи поверхностных и объемных «магнитных зарядов» необходимо определять их одновременно самосогласованным образом, причем с учетом реальной кривой намагничивания материала. Выполненные в [37] расчеты позволили установить плотность «зарядов» на гранях несплошности и поле поверхностного дефекта.

В предложенной в [38] расчетной модели дефект был представлен в виде тонкого бесконечного соленоида прямоугольного сечения с длиной, равной глубине дефекта, высотой, равной ширине его раскрытия, по которому протекает ток с поверхностной плотностью, равной нормальной составляющей намагниченности ферромагнитного полупространства, в котором находится данный дефект. Получены выражения для расчета тангенциальной и нормальной составляющих магнитного поля прямого и наклонного поверхностных дефектов, находящихся в ферромагнитном объекте в приложенном магнитном поле.

В [39] произведен расчет модели поверхностного дефекта в виде прямоугольной канавки в нелинейной магнитной среде. Расчет инициирующего осуществлялся по формулам поля Н. Н. Зацепина – В. Е. Щербинина [7], а величина плотности «магнитных зарядов» о определялась самосогласованным образом, т. е. с учетом поля «объемных зарядов», как это описано в [37]. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментом показало их хорошее совпадение.

В [40] получены формулы составляющих напряженности магнитного поля поверхностного дефекта в виде прямоугольного паза при намагничиваферромагнетика неоднородным нии полем магнитов. Исследована зависимость распределения напряженности поля от смещения дефекта относительно центра намагничивающей системы. Анализ аналитических выражений поля рассеяния дефекта для рассматриваемой модели намагничивающей системы показывает, что оптимальность распочувствительных элементов ложения преобразователя, установленная ДЛЯ однородного намагничивающего поля, сохраняется и для неоднородного. Однако в последнем случае форма выходного сигнала преобразователя от дефекта зависит от неоднородности намагничивающего поля и зависимость становится существенной при отношении величины намагничиваемой зоны  $\Delta_{x\mu}$  к величине зоны чувствительности преобразователя  $\Delta_{xe}$  менее 5. Разумеется, данная цифра справедлива лишь для

введенных здесь критериев определения величин  $\Delta_{xh}$  и  $\Delta_{xe}$ .

В [41] выполнен расчет магнитостатического поля, наклонного к поверхности изделия дефекта в виде щели при однородном и неоднородном распределении магнитных поляризационных «зарядов» вдоль его граней. Анализируются выражения для тангенциальной и нормальной составляющих поля в зависимости от угла наклона плоскости дефекта относительно нормали к поверхности. Сравнение расчетных данных с экспериментом показало, что учет неоднородности распределения «зарядов» вдоль граней дает лучшее совпадение с экспериментом, чем модель однородной поляризации. Выявлено, что при прочих равных условиях величина нормальной и тангенциальной компонент поля практически не зависит от угла наклона плоскости дефекта.

В [42] получены формулы для расчета плотности поверхностных «зарядов» на гранях дефекта конечной протяженности в пластине конечной толщины и магнитного поля рассеяния дефекта над поверхностью ферромагнетика. Установлено, что влияние толщины тонкой ферромагнитной пластины на магнитное поле рассеяния дефекта более существенно, чем в случае толстой пластины, и им можно пренебречь, если глубина дефекта составляет менее 20...25 % от толщины изделия.

На зависимость величины магнитного поля от протяженности дефекта слабо влияют раскрытие дефекта и толщина изделия, существенное воздействие оказывает высота точки измерения. Влиянием протяженности дефекта на его магнитное поле можно пренебречь, если выполняются условия:  $l/h \le 2...3$  (где l – длина, а h – глубина дефекта) – в случае толстой пластины и  $l/h \le 8$  – тонкой ферромагнитной.

В [43] с помощью приближенной модели обтекания потоком индукции выведены аналитические выражения для плотности «магнитных зарядов» на

поверхностях дефекта.

В [44, 45] получена динамическая модель дефекта сплошности при нормальном намагничивании полем стержневого магнита конечных размеров. Установлено, что при нормальном намагничивании объекта стержневым магнитом существует продольная составляющая магнитного поля, намагничивающая боковые грани дефекта сплошности, тем самым образовывая дополнительное магнитное поле, искажающее распределение магнитного поля рассеяния дефекта, создаваемого лишь за счет нормального намагничивающего поля. При этом выявляемость дефекта ухудшается. Наиболее существенное искажение распределения магнитного поля рассеяния дефекта характерно для дефектов малого раскрытия. С увеличением раскрытия искажение распределения магнитного поля рассеяния дефекта уменьшается и приближается к распределению магнитного поля при действии только лишь нормальной составляющей. Полученная модель позволяет для заданной глубины дефекта выбрать режим намагничивания, обеспечивающий наилучшую его выявляемость при нормальном намагничивании.

В [46] проводится численный анализ конфигурации магнитных полей ферромагнитных объектов ограниченной протяженности с поверхностными дефектами сплошности конечных размеров произвольной формы с использованием метода пространственных интегральных уравнений. Разработанная методика численного моделирования магнитного поля объектов контроля сложной формы показала достаточно высокую объективность, в том числе и при анализе полей объектов ограниченной протяженности с поверхностными дефектами сплошности. Данная методика дает возможность изучить характер распределения магнитного поля объектов, имеющих поверхностные дефекты сплошности, с учетом их геометрических особенностей и магнитных свойств материалов. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании более эффективных технических средств неразрушающего контроля магнитным методом, позволяющим повысить выявляемость поверхностных дефектов в ферромагнитных объектах, обладающих сложной геометрической конфигурацией.

Проведенный анализ показал, что в работах рассматривается характер изменения поля в зоне дефектов различной конфигурации, находящихся в объекте, намагниченном постоянным однородным полем. При этом не учитывается возможное его изменение по ширине и глубине несплошности.

В [47, 48] установлены закономерности изменения магнитного поля в зоне поверхностного дефекта в виде прямоугольной щели объекта, намагниченного неподвижным постоянным магнитом, обращенным к объекту гранью с одним полюсом, учитывающие изменение намагничивающего поля с увеличением глубины и расстояния от плоскости симметрии магнита до дефекта, позволившие объяснить вид сигнала, обусловленного дефектом, при магнитографическом контроле с использованием для считывания записи с магнитной ленты дефектоскопов с индукционными магнитными головками.

Показано, что расчетная сигналограмма несплошности «с дном» ферромагнитного объекта, смещенной относительно плоскости симметрии неподвижного магнита, обращенного к объекту гранью с одним полюсом, асимметричного вида и содержит два положительных и два отрицательных экстремума, а ее положительная часть имеет глубокий провал. Степень асимметрии сигнала зависит от расстояния дефекта до плоскости симметрии магнита и объясняется нахождением граней несплошности в поле разной напряженности и неравномерным распределением «магнитных зарядов» на поверхности объекта и дне дефекта. Неравномерность распределения «магнитных зарядов» на боковых стенках дефекта необходимо учитывать при глубине несплошности более 3 мм и ее расположении на расстоянии более 0,25 ширины полюса магнита. Экспериментальные сигналограммы качественно близки к расчетным только для несплошностей, ширина которых больше, чем в 2,5 раза превышает толщину сердечника индукционной головки дефектоскопа, что опредеразрешающей способностью ляется прибора. Если несплошность имеет ширину меньше 2,5 мм, то характерный провал на сигналограмме отсутствует, а ее отрицательные экстремумы становятся много меньше по модулю положительного.

В результате проведенного анализа литературных источников выявлено, что основными моделями дефектов в теоретических исследованиях магнитных полей рассеяния, возникающих при намагничивании ферромагнитных объектов, являются двугранный угол, полуцилиндрический и полукруговой профили, полуэллипсоид и полушар, бесконечно вытянутые эллиптический и круговой цилиндры, трещина, две параллельные щели, клин, бесконечно длинный прямоугольный паз, наклонный поверхностный дефект в виде щели, модель «углубленных зарядов», модель бесконечно тонкого соленоида прямоугольного сечения, длина которого равна ширине дефекта, а высота – его глубине. Во всех приведенных случаях решалась прямая задача, когда по известным параметрам дефекта при известной напряженности поля, с определенными принятыми допущениями, определяли составляющие напряженности магнитного поля рассеяния дефекта или суперпозиции полей в его зоне. В ряде работ с использованием ЭВМ получены математические модели, которые количественно описывают поля рассеяния с учетом параметров дефектов и магнитных свойств контролируемого объекта, что позволило решить обратную задачу.

Задачи решались методом «магнитных зарядов» в предположении, что  $\mu$  = const; поле рассеяния поверхностных дефектов описывалось посредством интегральных уравнений, решаемых методом последовательных приближений; иногда учитывалась нелинейность ферромагнитной среды.

Недостатком всех приведенных расчетов является то, что плотность «поляризационных зарядов» на поверхностях дефектов остается неизвестной [8, 14, 16]. Многие расчеты [1, 3, 7] для напряженности поля рассеяния в точках непосредственно у углов выхода трещины на поверхность дают бесконечно большие величины, кроме того, ни один из них не учитывает нелинейность магнитных характеристик материала образца. Иными словами, не отражается тот факт, что вследствие нелинейного намагничивания материала «поляризационные заряды» возникают не только на гранях трещины, но и в объеме материала, причем объемные «магнитные заряды» играют существенную роль в создании поля рассеяния дефекта [7]. Недостатком рассмотренных выше моделей полей рассеяния дефектов [2, 5, 7, 11, 14, 18] является то, что они не учитывают краевые эффекты, а принятый линейным закон распределения «поляризационных зарядов» приводит к значительному усложнению расчетных выражений [14]. Поэтому для таких моделей можно говорить только о качественном соответствии, так как плотность поверхностных «магнитных зарядов» не известна.

Положительным моментом является то, что полученные модели дают возможность для заданной глубины дефекта изучить характер распределения магнитного поля объектов, имеющих поверхностные и внутренние дефекты сплошности с учетом их геометрических особенностей, а в ряде случаев и магнитных свойств материалов, выбрать режим намагничивания, обеспечивающий наилучшую их выявляемость при тангенциальном и нормальном намагничивании объектов, обладающих сложной геометрической конфигурацией. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании эффективных более технических средств неразрушающего контроля магнитным методом, позволяющих повысить выявляемость дефектов в ферромагнитных объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркадьев, В. К. О развитии теоретических основ дефектоскопии / В. К. Аркадьев // Изв. АН СССР. Отдел техн. наук. – 1937. – № 2. – С. 233–240.

2. **Губанов, А. И.** Расчет магнитного поля двугранного угла / А. И. Губанов // Журнал технической физики. – 1940. – Т. 10, вып. 5. – С. 376–394.

3. Большаков, П. Н. Исследование магнитных полей от поверхностных неоднородностей при электромагнитной дефектоскопии : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.11. – Томск, 1949. – 100 с.

4. Сапожников, А. Б. Основы электромагнитной дефектоскопии металлических тел : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.11. – Томск, 1951. – 645 с.

5. **Томилов,** Г. С. Исследование распределения индукции в массивных стальных изделиях при локальном намагничивании их при помощи приставных электромагнитов / Г. С. Томилов // Дефектоскопия. – 1966. – № 3. – С. 77–85.

6. Сапожников, А. Б. К расчету поляризации некоторых простейших включений в постоянном магнитном поле / А. Б. Сапожников, И. А. Новикова // Тр. СФТИ. Электромагнитные методы контроля, магнитное экранирование, электродинамика простейших сред. – Томск, 1970. – Вып. 52. – С. 129–132.

7. Зацепин, Н. Н. К расчету магнитостатического поля поверхностных дефектов. І. Топография полей моделей дефектов / Н. Н. Зацепин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 50–58.

8. **Маринчук, М. Е.** Исследование магнитостатических полей некоторых моделей поверхностных дефектов / М. Е. Маринчук, Н. С. Саворовский // Дефектоскопия. – 1969. – № 6. – С. 63–68.

9. Förster, F. Principi teorici e sperimentali del contollo non distruttivo con rivelarionare del flusso disperse / F. Förster // La Metallurgia Italiana. – 1972. – № 4. – P. 137–147.

10. **Förster, F.** Computer-controlled magnetic leakage field research Installation-examples and possibilities / F. Förster // 10-th World Conference on nondestructive testing. – 1982. – Vol. 1. – P. 172–186.

11. **Ферстер**, **Ф**. Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния. Теоретические и экспериментальные основы выявления поверхностных дефектов конечной и бесконечной глубины / Ф. Ферстер // Дефектоскопия. – 1982. – № 11. – С. 3–25.

12. **Куликов, В. Н.** Исследование магнитостатических полей в зоне точечного сварного соединения / В. Н. Куликов // Дефектоскопия. – 1981. – № 8. – С. 39–47.

13. **Куликов, В. Н.** Исследование и разработка способа оценки качества и прочности точечных сварных соединений на базе магнитографического метода контроля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.05 / В. Н. Куликов ; МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 1979. – 17 с.

14. **Щербинин, В. Е.** Влияние протяженности дефекта на величину его магнитного поля / В. Е. Щербинин, А. И. Пашагин // Дефектоскопия. – 1972. – № 4. – С. 74–82.

15. Новикова, И. А. Цилиндрическая индукционная катушка прямоугольного сечения в сильно неоднородном постоянном магнитном поле / И. А. Новикова // Докл. XX науч.-техн. конф. по радиоэлектронике, посвященной 50-летию образования СССР. – Томск : Томск. ун-т, 1974. – С. 66–76.

16. **Щербинин, В. Е.** Об объемной поляризации трещины / В. Е. Щербинин, А. И. Пашагин // Дефектоскопия. – 1974. – № 4. – С. 106–110.

17. **Новикова, И. А.** Исследование полей искусственных открытых дефектов / И. А. Новикова, Н. В. Мирошин // Дефектоскопия. – 1973. – № 4. – С. 95–101.

18. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник / Под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1976. – Кн. 1–2.

19. Кифер, И. И. Магнитные методы дефектоскопии / И. И. Кифер, Н. Н. Зацепин // Дефектоскопия. – 1969. – № 5. – С. 76–82.

20. Lord, W. Defect characterization from magnetic leakage fields / W. Lord, I. H. Hwang // Brit. J. NDT. – 1977. – № 1. – P. 14–18.

21. Residual and active leakage fields around defects in ferromagnetic materials / W. Lord [et al.] // Mater. Evaluation. – 1978. – № 7. – P. 47–54.

22. **Förster, F.** Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung mit magnetishhem Streufluss / F. Förster // 3 European Conference on Nondestructive Testing, Florence, 15–18 October. – 1984. – P. 287–303.

23. **Янус, Р. И.** Задачи по магнитной дефектоскопии / Р. И. Янус // Тр. ИФМ АН СССР. – Свердловск, 1979. – С. 54–57.

24. Семенов, В. С. Постоянное магнитное поле тел прямоугольного сечения, намагничиваемых источниками различных типов без учета взаимодействия поверхностных магнитных зарядов / В. С. Семенов, О. К. Радугин // Тр. СФТИ. Электромагнитные методы контроля, магнитное экранирование, электродинамика простейших сред. – Томск : Томск. ун-т, 1970. – Вып. 52. – С. 81–91.

25. Мохова, Е. Н. Прямоугольная призма постоянной восприимчивости в однородном магнитном поле / Е. Н. Мохова // Изв. АН СССР. Серия геофизическая. – 1958. – № 3. – С. 387–390.

26. **Щербинин, В. Е.** Плотность поверхностных зарядов на границах дефектов типа трещин / В. Е. Щербинин, А. И. Пашагин // Магнитные методы неразрушающего контроля : сб. ст. – Свердловск : ЦНУ АН СССР, 1979. – С. 54–57.

27. Новикова, И. А. Исследование полей поверхностных дефектов полуэллиптического и полукругового профилей по методу постоянного магнитного поля / И. А. Новикова, А. Б. Сапожников // Электромагнитные методы измерения, контроля и исследования свойств материалов. – Томск : Томск. ун-т, 1982. – С. 159–170.

28. **Bainton, K. F.** Characterizing defects by determining magnetic leakage fields / K. F. Bainton // Non-Destructive Testing International. – 1977. – Vol. 10, № 5. – P. 253–257.

29. **Dobmann, G.** New set-ups for mathemathical-numerical solutions of magnetic leakage-flux testing with DS- and AC-mode in the FRG / G. Dobmann, G. Walle // 10-th World Conference on nondestructive testing. -1982. -Vol. 2. -P. 148–155.

30. **Гринберг, Г. А.** Некоторые специальные методы решения электростатических и магнитостатических задач / Г. А. Гринберг // Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М. ; Л. : АН СССР, 1949. – С. 255–320.

31. **Гусев, А. П.** Магнитное поле дефекта при нормальном намагничивании / А. П. Гусев, Н. Н. Зацепин // Вес. АНБ. – 1982. – № 3. – С. 102–107.

32. Об одном подходе к оценке параметров дефектов в реальном времени при наличии случайных возмущений / И. А. Новикова [и др.] // Дефектоскопия. – 1983. – № 6. – С. 47–52.

33. **Новикова, И. А.** Математическая модель, количественно описывающая магнитостатические поля поверхностных дефектов, и ее применение в задачах дефектометрии / И. А. Новикова // Дефектоскопия. – 1986. – № 2. – С. 37–45. 34. Шур, М. Л. Расчет поля поверхностного дефекта в нелинейной ферромагнитной среде / М. Л. Шур, Р. В. Загидулин, В. Е. Щербинин //Дефектоскопия. – 1987. – № 2. – С. 3–9.

35. **Мужицкий, В. Ф.** Модель поверхностного дефекта и расчет топографии его магнитостатического поля / В. Ф. Мужицкий // Дефектоскопия. – 1987. – № 3. – С. 24–29.

36. **Мужицкий, В. Ф.** К расчету магнитостатических полей рассеяния от поверхностных дефектов конечной глубины / В. Ф. Мужицкий // Дефектоскопия. – 1987. – № 7. – С. 8–13.

37. Шур, М. Л. Теоретические вопросы формирования поля поверхностного дефекта / М. Л. Шур, Р. В. Загидулин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1988. – № 3. – С. 14–25.

38. **Мужицкий**, **В. Ф.** Модель поверхностного дефекта при нормальном намагничивании и расчет топографии его магнитостатического поля / В. Ф. Мужицкий // Дефектоскопия. – 1988. – № 7. – С. 3–7.

39. Шур, М. Л. Самосогласованный расчет магнитостатического поля поверхностного дефекта / М. Л. Шур, Р. В. Загидулин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1988. – № 10. – С. 3–13.

40. Гусев, А. П. Магнитное поле поверхностного дефекта при намагничивании ферромагнетика неоднородным полем магнитов / А. П. Гусев, П. Н. Поярков // Дефектоскопия. – 1992. – № 11. – С. 71–75.

41. **Пашагин, А. И.** Магнитное поле дефекта, наклонного к поверхности изделия / А. И. Пашагин, Н. В. Яковлева // Дефектоскопия. – 1994. – № 5. – С. 53–58.

42. Загидулин, Р. В. Трехмерная модель дефекта сплошности конечной протяженности в ферромагнитной пластине / Р. В. Загидулин, В. Ф. Мужицкий // Дефектоскопия. – 2002. – № 11. – С. 17–25.

43. **Мужицкий, В. Ф.** Магнитное поле короткого дефекта типа прямоугольной щели / В. Ф. Мужицкий, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 2006. – № 2. – С. 58–63.

44. Загидулин, Р. В. Динамическая модель дефекта сплошности при нормальном намагничивании ферромагнитного изделия І. Магнитостатическое поле дефекта сплошности конечной протяженности / Р. В. Загидулин, В. Ф. Мужицкий, Д. А. Исаев // Дефектоскопия. – 2006. – № 10. – С. 17–23.

45. Загидулин, Р. В. Динамическая модель дефекта сплошности при нормальном намагничивании ферромагнитного изделия II. Магнитное поле дефекта сплошности при намагничивании изделия намагничивающим устройством конечных размеров / Р. В. Загидулин, В. Ф. Мужицкий, Д. А. Исаев // Дефектоскопия. – 2006. – № 11. – С. 17–23.

46. Гальченко, В. Я. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений / В. Я. Гальченко, Д. Л. Остапущенко, М. А. Воробьев // Дефектоскопия. – 2009. – № 3. – С. 56–65.

47. Исследование распределения напряженности магнитного поля у поверхности ферромагнитного объекта, намагничиваемого перемещаемым постоянным магнитом / В. А. Новиков [и др.] // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 2. – С. 81–84.

48. **Новиков, В. А.** Магнитное поле в зоне поверхностного дефекта объекта, намагниченного стационарным малогабаритным магнитом / В. А. Новиков, Г. И. Скрябина, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 159–165.

Статья сдана в редакцию 12 ноября 2013 года

Андрей Валерьевич Кушнер, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0298-45-85-76.

**Владимир Алексеевич Новиков,** д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: novikovva@tut.by.

Andrei Valeryevich Kushner, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0298-45-85-76.

Vladimir Alekseyevich Novikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: novikovva@tut.by.

## УДК 620.179.1

## В. А. Новиков, А. В. Шилов

# ГРАНИЦЫ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ ПОЛЯ ПЛЕНКИ

## UDC 620.179.1

V. A. Novikov, A. V. Shilov

# APPLICATION LIMITS OF THE MAGNETIC METHOD OF TESTING BY MEANS OF A FIELD VIEWING FILM

#### Аннотация

Установлена зона удовлетворительной выявляемости дефектов при использовании для контроля ферромагнитных объектов визуализирующей магнитные поля пленки. Экспериментально определено положение ее границ в зависимости от режима намагничивания, диаметра и глубины залегания дефекта, параметров электромагнита, положения магнитной пленки на объекте по отношению к электромагниту. В области удовлетворительной выявляемости дефектов исследованы особенности трансформации индикаторных рисунков компактных и протяженных внутренних дефектов на пленке при изменении их параметров и взаимного расположения.

#### Ключевые слова:

магнитный контроль, визуализация магнитного поля, дефекты сплошности, индикаторные рисунки дефектов, границы применения, условия контроля.

#### Abstract

The zone of satisfactory detection of defects by using the field viewing film has been determined to control ferromagnetic objects. Its boundaries have been experimentally defined depending on the mode of magnetization, the defect diameter and its depth, electromagnet parameters and the position of the magnetic film on an object relative to the electromagnet. Within the zone of satisfactory detection of defects the peculiarities of the transformation of indicator pictures of compact and extended internal defects on the film have been determined when their parameters and mutual arrangement change.

### Key words:

magnetic control, visualization of the magnetic field, integrity defects, indicator pictures of defects, application limits, testing conditions.

Для успешного использования методов неразрушающего контроля материалов и изделий необходимо определить границы их применения. Так, магнитографический метод контроля используют в основном для обнаружения дефектов в сварных швах. При этом рекомендуют изделие намагничивать таким образом, чтобы магнитная лента находилась в зоне однородного поля намагничивающего устройства. Границы применения метода определяются

© Новиков В. А., Шилов А. В., 2014

толщиной объекта от 2 до 25 мм, ограничения налагают также на параметры выпуклости шва [1–3].

При магнитопорошковом методе одновременно контролируют большие площади объектов. Высокие требования предъявляют к качеству подготовки контролируемой поверхности. При контроле способом приложенного поля с намагничиванием контролируемой зоны приставным П-образным электромагнитом в межполюсном пространстве объекта имеются зоны неудовлетворительной выявляемости наружных дефектов. Это участки поверхности шириной от 10 до 25 мм, прилегающие к полюсам электромагнита [4, 5]. Наличие зон нечувствительности объясняется тем, что частицы магнитного порошка удаляются пондеромоторной силой, обусловленной неоднородностью магнитного поля, вблизи полюсов магнита.

Магнитный метод контроля, основанный на применении визуализирующей магнитные поля пленки, обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами. Это высокая оперативность, возможность обнаружения дефектов в объектах с грубой поверхностью, простота осуществления, многократное использование магнитной пленки, наглядность результатов контроля, отсутствие необходимости в специальных приборах для обнаружения дефектов. Он позволяет количественно оценить дефекты с учетом глубины их залегания. Для обеспечения высокой достоверности обнаружения дефектов следует определить границы применения метода с учетом режима намагничивания, глубины залегания и величины дефекта, параметров электромагнита, положения магнитной пленки на объекте по отношению к электромагниту. Целесообразно также исследовать особенности трансформации индикаторных рисунков компактных и протяженных внутренних дефектов на пленке при изменении их параметров и взаимного расположения.

Исследования проводили на образцах из горячекатаной стали и стального литья. Образцы имели вид параллелепипеда размерами 330×40×25 мм и пластин габаритами 400×300×30 мм, которые учитывали растекание магнитного потока в изделии. В образцах в форме параллелепипеда были выполнены отверстия диаметром 2, 4 и 6 мм на различной глубине, с шагом 2,5 мм, параллельно поверхности 330×40 мм. Кроме того, на наружной поверхности образца была профрезерована канавка шириной 0,5 и глубиной 1 мм. Торцевые поверхности литых пластин размерами 400×30 мм были обработаны до параметра шероховатости Rz 320. В них были выполнены углубления диаметром 4 мм и протяженностью 40 мм на глубине 16 и 25 мм параллельно поверхности 400×300 мм пластины. Размеры искусственных дефектов в литых образцах соответствовали минимальному браковочному уровню на реальный объект контроля – опору автомобиля БелАЗ. Были изготовлены также сварные образцы толщиной 12 мм со снятой выпуклостью шва. Они содержали скопления внутренних несплошностей размером 2...3 мм, одиночные шлаковые включения диаметром 6 мм и протяженные трещины.

Намагничивание объектов производили электромагнитом с П-образным сердечником: сечение полюса 170×60 мм, число витков провода диаметром 1,4 мм – 550. Напряжение на обмотку электромагнита подавали от источника постоянного тока IRPS 60B/20A. Для записи полей рассеяния дефектов применяли пленку, визуализирующую магнитные поля.

Установлено, что при намагничивании образцов толщиной более 25 мм электромагнитом с межполюсным расстоянием 90 мм (сечение полюса 170×60 мм) на пленке появляется помеха, вызванная полем намагничивающего устройства и проявляющаяся в виде светлой полосы, расположенной параллельно полюсам намагничивающего устройства. Так. при намагничивании объектов толщиной 30 мм ширина этой полосы составляет около 15 мм (рис. 1). Ширина полосы уменьшается, а ее яркость возрастает при увеличении зазора между полюсами и поверхностью объекта. Наличие дефекта сплошности, находящегося в объекте под этой полосой, может установить оператор с большим опытом работы. При увеличении межполюсного расстояния электромагнита, уменьшении толщины стенки контролируемого объекта ширина полосы увеличивается, а ее яркость снижается. Например, в образцах толщиной 30 мм при расстоянии между полюсами электромагнита 200 мм эта помеха становится малозаметной.

Методика проведения исследований по определению зоны удовлетворительной выявляемости дефектов заключалась в следующем. Стальной образец размерами 330×40×25 мм укладывали

на полюсы П-образного электромагнита, затем на контролируемую поверхность помещали магнитную пленку и образец намагничивали. Исследования выполняли для двух случаев. В одном из них электромагнит и пленку располагали с одной стороны образца (рис. 2, а), во втором – с противоположных сторон (рис. 2, б).



Индикаторный рисунок от цилиндрического углубления

Помеха

Рис. 1. Индикаторный рисунок внутреннего цилиндрического углубления диаметром 4 мм на расстоянии 6,5 мм от поверхности в литом образце толщиной 30 мм с грубой поверхностью при расстоянии между полюсами электромагнита 90 мм



Рис. 2. Схемы намагничивания: а – пленка и электромагнит находятся с одной стороны контролируемого образца; б - пленка и электромагнит находятся с противоположных сторон образца; 1 - плоскость внутренней грани полюса электромагнита; 2 – электромагнит; 3 – внутренний дефект; 4 – образец; 5 – пленка, визуализирующая магнитные поля
Положительная ось ординат h (см. рис. 2) находится в плоскости внутренней грани 1 полюса электромагнита 2, ближайшего к дефекту 3, и направлена в сторону объекта 4. Положительная ось абсцисс l совпадает с поверхностью образца 4, на которую уложена пленка 5, визуализирующая магнитные поля, и направлена в сторону второго полюса электромагнита. После обнаружения индикаторного рисунка дефекта на визуализирующей магнитные поля пленке последовательно перемещали электромагнит и (или) образец, приближая дефект к внутренней грани ближайшего полюса электромагнита. Образец контролировали на наличие этого дефекта. Взаимное перемещение образца и (или) электромагнита и контроль образца производили до тех пор, пока не начинал исчезать индикаторный рисунок дефекта на пленке (при дальнейшем приближении дефекта к внутренней грани полюса электромагнита дефект не обнаруживался). Замеряли расстояние l от этой грани полюса магнита до индикаторного рисунка дефекта. Строили график зависимости l(h) для случаев, когда магнитоноситель и электромагнит находились с одной (рис. 3) или с противоположных сторон образца (рис. 4).

Из рис. З видно, что ширина зоны нечувствительности, примыкающей к полюсу электромагнита, зависит от диаметра дефекта и глубины его залегания для электромагнита с сечением полюса 170×60 мм и межполюсным расстоянием 200 мм.

Если же пленка и электромагнит находятся с противоположных сторон образца, то зона уверенного обнаружения дефектов выходит за пределы плоскости внутренней грани полюса электромагнита (см. рис. 4) и также зависит от диаметра и глубины залегания дефекта.



Рис. 3. Зависимость ширины зоны нечувствительности от глубины залегания дефекта, когда электромагнит и магнитоноситель расположены с одной стороны объекта: напряженность намагничивающего поля 500 А/см; толщина образца 25 мм; 1 – диаметр дефекта 6 мм; 2 – диаметр дефекта 4 мм; 3 – диаметр дефекта 2 мм



Рис. 4. Зависимость ширины зоны нечувствительности от глубины залегания дефекта, когда электромагнит и магнитоноситель расположены с противоположных сторон образца: напряженность намагничивающего поля 500 А/см; толщина образца 25 мм; 1 – диаметр дефекта 2 мм; 2 – диаметр дефекта 4 мм; 3 – диаметр дефекта 6 мм

Исследование влияния высоты полюсов электромагнита на выявляемость дефектов при перемещении электромагнита производили на образце толщиной 25 мм с цилиндрическими отверстиями диаметром 2 мм, выполненными на различной глубине с шагом 2,5 мм. Эксперименты по определению границы зоны нечувствительности проводили по приведенной выше методике на электромагнитах с высотой полюсов 70, 85, 115 и 160 мм. Все параметры электромагнитов, кроме высоты полюсов, были постоянные. Результаты измерений для случая, когда электромагнит и пленка расположены с одной стороны образца, представлены на рис. 5. Из рисунка следует, что высота полюсов электромагнита практически не оказывает влияния на ширину зоны нечувствительности при постоянной глубине залегания дефекта.

Для исследования влияния межполюсного расстояния П-образного электромагнита на ширину зоны нечувствительности в образце, когда пленка и электромагнит находятся с одной стороны образца, использовали сердечники длиной 90, 120, 160, 180 и 200 мм. График зависимости ширины зоны нечувствительности l от межполюсного расстояния  $L_p$  представлен на рис. 6. Из рисунка видно, что с увеличением межполюсного расстояния от 90 до 200 мм ширина зоны нечувствительности изменяется от 4 до 7 мм по линейному закону.

Влияние режима намагничивания на ширину зоны нечувствительности исследовали на образце толщиной 25 мм с отверстиями диаметром 2 мм, выполненными на глубине от 2,5 до 22,5 мм с шагом 5 мм. Эксперименты проводили при напряженности поля от 160 до 650 А/см по описанной выше методике. Результаты исследований представлены на рис. 7. Из рисунка видно, что ширина зоны нечувствительности уменьшается с ростом глубины залегания дефекта и увеличением напряженности намагничивающего поля. Так, при напряженности поля 160 А/см и глубине залегания дефекта 22,5 мм это расстояние составляет 23 мм, а при напряженности поля 480 А/см и глубине залегания 2,5 мм – 3 мм.



Рис. 5. Зависимость ширины зоны нечувствительности от высоты полюсов электромагнита при различной глубине залегания дефекта: 1 – глубина залегания 17,5 мм; 2 – 12,5 мм; 3 – 7,5 мм; 4 – 2,5 мм



Рис. 6. Зависимость ширины зоны нечувствительности от расстояния между полюсами электромагнита

Проведенные исследования показали, что если электромагнит и пленка находятся с одной стороны образца, то для поверхностного дефекта зоны нечувствительности в межполюсном пространстве электромагнита отсутствуют. Наличие таких зон при магнитопорошковом контроле объясняется тем, что частицы магнитного порошка удаляются пондеромоторной силой вследствие неоднородного поля вблизи полюсов магнита. В визуализирующей поля пленке магнитные частицы находятся в геле, помещенном в небольшие капсулы, закрепленные на немагнитной подложке, и могут перемещаться только в пределах капсулы. Поэтому для поверхностных дефектов зоны нечувствительности отсутствуют. Трещины уверенно обнаруживаются в непосредственной близости от полюса. Если электромагнит и пленка находятся по разные стороны образца, то поверхностные дефекты обнаруживаются, даже если они находятся над полюсом электромагнита, приблизительно на расстоянии половины толщины образца.



Рис. 7. Зависимость ширины зоны нечувствительности от напряженности намагничивающего поля для глубины залегания: 1 – h = 22,5 мм; 2 – h = 17,5 мм; 3 – h = 12,5 мм; 4 – h = 7,5 мм; 5 – h = 2,5 мм

Таким образом, установлено, что на ширину зон нечувствительности, примыкающих к полюсам электромагнита с П-образным сердечником, когда визуализирующая магнитные поля пленка и электромагнит находятся с одной стороны образца, влияют глубина залегания и диаметр дефекта, расстояние между полюсами и режим намагничивания. Следовательно, если для контроля объекта, представляющего собой пластину с выполненными в ней технологическими цилиндрическими отверстиями известного диаметра, использовать электромагнит с известными параметрами, а контроль осуществлять при конкретном режиме намагничивания, то можно определить глубину залегания отверстия (по предварительно построенному графику зависимости ширины зоны нечувствительности от глубины залегания) и его диаметр (если известна глубина залегания).

Установлено, что при контроле образцов с крупными протяженными дефектами (диаметром 4...6 мм), параллельными поверхности и находящихся на небольшом расстоянии друг от друга (до 12 мм), на визуализирующей магнитные поля пленке наблюдается широкая светлая полоса, а по обе ее стороны – темные полосы, т. е. несколько дефектов воспринимаются как один дефект большей ширины. Увеличение расстояния между дефектами (до 30...40 мм) приводит к появлению отдельных индикаторных рисунков, между которыми отмечаются светлые полосы. Это объясняется тем, что тангенциальная составляющая поля дефекта по мере удаления от плоскости его симметрии вначале убывает до минимума, а затем возрастает, причем суперпозиция тангенциальных составляющих полей на одинаковом расстоянии от дефектов может достигать значительной величины и вызвать появление светлой полосы на пленке. Дальнейшее увеличение расстояния между дефектами приводит к «размыванию» между ними светлой полосы на пленке.

На рис. 8, а представлено изображение индикаторных рисунков трех параллельных цилиндрических отверстий диаметром 6 мм, находящихся на глубине 15, 12,5 и 10 мм в образце толщиной 25 мм, выполненных на расстоянии 40 мм друг от друга при контроле образца в приложенном поле электромагнита. Как видно из рисунка, кроме индикаторных рисунков дефектов 1, появились индикаторные рисунки помех 2. Если диаметр отверстий 2 мм, то при расстоянии между ними более 20 мм светлые полосы малозаметны.



Рис. 8. Изображение индикаторных рисунков на визуализирующей магнитные поля пленке трех параллельных цилиндрических отверстий диаметром 6 мм, на глубине 15, 12,5 и 10 мм, в образце толщиной 25 мм, на расстоянии 40 мм (а) и соответствующий им график зависимости коэффициента отражения пленки от расстояния до полюса электромагнита (б)

На рис. 8, б представлен график зависимости коэффициента отражения пленки от расстояния до полюса электромагнита (методика экспериментальных исследований описана в [6]). Из рисунка видно, что каждому дефекту соответствует ярко выраженный симметричный максимум 1 и два минимума по обе его стороны (см. рис. 8, б). Помехам соответствуют импульсы 2 меньшей амплитуды и большей длительности. Дальнейшее увеличение расстояния между дефектами приводит к уменьшению помех.

На рис. 9 показаны индикаторные рисунки, обусловленные скоплениями внутренних несплошностей величиной 2...3 мм, находящихся на глубине 6 мм, при контроле в приложенном поле. Из рисунка видно, что по обе стороны следа проекции дефекта на пленке, в направлении намагничивания, наблюдается потемнение пленки. При увеличении диаметра дефекта до 6 мм это изображение трансформируется темное В пятно

овальной формы, которое с двух сторон охватывают светлые полосы (рис. 10). Такую трансформацию индикаторных рисунков дефектов можно объяснить значительным уменьшением тангенциальной составляющей поля дефекта в его средней части при увеличении диаметра дефекта.

На рис. 11 показаны индикаторные рисунки внутренних трещин в сварном шве со снятой выпуклостью, имеющие вид светлых извилистых рельефных линий, по обе стороны которых наблюдаются широкие темные полосы.



Индикаторные рисунки внутренних несплошностей

Рис. 9. Индикаторные рисунки от скопления внутренних несплошностей в образце толщиной 12 мм, находящиеся на глубине 6 мм, величиной от 2 до 3 мм



Индикаторные рисунки шлаковых включений

Рис. 10. Индикаторные рисунки шлаковых включений в образце толщиной 12 мм, находящиеся на глубине 6 мм



Рис. 11. Индикаторные рисунки внутренних трещин в образце толщиной 12 мм

Приборостроение

трещин

# Заключение

При намагничивании объектов толщиной более 20 мм электромагнитом с межполюсным расстоянием меньше 90 мм на визуализирующей магнитные поля пленке, уложенной на поверхность объекта, появляется помеха в виде светлой полосы шириной 10...15 мм, расположенная параллельно полюсам электромагнита в плоскости их симметрии. Ширина полосы уменьшается, а ее яркость возрастает при увеличении зазора между полюсами и поверхностью объекта. Наличие дефекта сплошности, находящегося в объекте под этой полосой, может установить оператор, имеющий большой опыт работы. Ширина полосы значительно увеличивается, а ее яркость снижается при увеличении межполюсного расстояния электромагнита и (или) уменьшении толщины стенки контролируемого объекта. Например, в объектах толщиной 30 мм при расстоянии между полюсами электромагнита 200 мм эта помеха становится малозаметной.

Определены условия контроля ферромагнитных объектов с толщиной стенки 25...30 мм, намагничиваемых П-образным электромагнитом, имеющим сечение полюса 170×60 мм, число витков 550 и границы применения метода:

- межполюсное расстояние - 200 мм;

 напряженность намагничивающего поля при обнаружении внутренних дефектов – от 500 до 650 А/см;

– если электромагнит и пленка находятся с одной стороны образца, то поверхностные трещины в образце уверенно обнаруживаются во всем межполюсном пространстве электромагнита. При этом, в отличие от магнитопорошкового метода контроля, магнитные частицы визуализирующей поля пленки не удаляются пондеромоторной силой вследствие неоднородного поля вблизи полюсов электромагнита, т. к. находятся в геле, помещенном в небольшие капсулы, и могут перемещаться только в пределах капсул. В объекте возникают зоны нечувствительности к внутренним дефектам. Эти зоны примыкают к внутренним граням полюсов электромагнита и становятся тем шире, чем больше глубина залегания дефекта, меньше его диаметр и напряженность намагничивающего поля. Зоны нечувствительности обусловлены тем, что нормальная составляющая внешнего поля возле полюсов магнита значительно больше тангенциальной компоненты, поэтому тангенциальная составляющая поля рассеяния дефекта слабо влияет на ориентацию магнитных частиц в пленке;

- если электромагнит находится с противоположной стороны объекта по отношению к пленке, то границы зон уверенного обнаружения поверхностных дефектов располагаются над полюсами магнита, и их положение зависит от толщины образца. Ухудшение обнаружения поверхностных дефектов, находящихся на большем расстоянии от внутренних граней полюсов электромагнита, объясняется резким уменьшением тангенциальной составляющей напряженности намагничивающего поля. Положение границ зоны уверенного обнаружения внутренних дефектов зависит от их диаметра и глубины залегания. Чем больше диаметр дефекта и меньше глубина его залегания, тем шире зона уверенного обнаружения внутренних дефектов в образце. Границы этой зоны могут находиться в межполюсном пространстве электромагнита и вне его.

В области удовлетворительной выявляемости дефектов установлены особенности трансформации индикаторных рисунков внутренних компактных и протяженных дефектов на пленке при изменении их параметров и взаимного расположения:

– при контроле в приложенном поле по обе стороны следа проекции компактного дефекта диаметром 2...3 мм на пленке, в направлении намагничивания, наблюдается потемнение. При увеличении диаметра дефекта до 6 мм это изображение трансформируется в темное пятно овальной формы, которое с двух сторон охватывают светлые полосы. Такую трансформацию индикаторных рисунков дефектов можно объяснить значительным уменьшением тангенциальной составляющей поля дефекта в его средней части при увеличении диаметра дефекта;

– при контроле образцов с крупными протяженными дефектами (диаметром 4...6 мм), параллельными поверхности и находящихся на небольшом расстоянии друг от друга (до 12 мм), на визуализирующей магнитные поля пленке наблюдается широкая светлая полоса, а по обе ее стороны – темные полосы, т. е. несколько дефектов воспринимаются как один дефект большей ширины. Увеличение расстояния между дефектами (до 30...40 мм) приводит к появлению отдельных индикаторных рисунков, между которыми отмечаются светлые полосы. Это объясняется тем. что тангенциальная составляющая поля дефекта по мере удаления от плоскости его симметрии вначале убывает до минимума, а затем возрастает, причем суперпозиция тангенциальных составляющих полей на одинаковом расстоянии от дефектов может достигать значительной величины и вызвать появление светлой полосы на пленке. Дальнейшее увеличение расстояния между дефектами приводит к «размыванию» между ними светлой полосы на пленке;

 индикаторные рисунки внутренних трещин имеют вид светлых извилистых рельефных линий, по обе стороны которых наблюдаются широкие темные полосы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25225-82. Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1982. – 13 с.

2. **Фалькевич, А. С.** Магнитографический контроль сварных соединений / А. С. Фалькевич, М. Х. Хусанов. – М. : Машиностроение, 1966. –176 с.

3. **Новиков, В. А.** Исследование магнитографического метода контроля стыковых сварных соединений с целью повышения его разрешающей способности : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.11 : защищена 22.03.85 : утв. 07.08.85 / Новиков Владимир Алексеевич. – Свердловск, 1985. – 204 с. – Библиогр. : с. 173–189. – 083272.

4. Шелихов, Г. С. Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов / Г. С. Шелихов – М. : Эксперт, 1995. – 224 с. : ил.

5. СТБ ЕН 1290-2002. Контроль неразрушающий сварных соединений. Магнитопорошковый метод. – Минск : Госстандарт, 2002. – 12 с.

6. **Новиков, В. А.** Исследование коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля в области дефекта / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 1. – С. 88–98.

#### Статья сдана в редакцию 6 января 2014 года

**Владимир Алексеевич Новиков,** д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. E-mail: novikovva@tut.by.

Андрей Владимирович Шилов, ведущий инженер, Белорусско-Российский университет.

Vladimir Alekseyevich Novikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. E-mail: novikovva@tut.by.

Andrei Vladimirovich Shilov, engineer, Belarusian-Russian University.

D

# СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

## УДК 624.012.25

## Е. М. Бабич, В. С. Довбенко

# ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ УСИЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

## UDC 624.012.25

## Y. M. Babich, V. S. Dovbenko

# **CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS**

## Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований трещиностойкости изгибаемых статически определимых балок, усиленных полимерной композицией проницаемого действия, при кратковременной однократной нагрузке.

#### Ключевые слова:

железобетонная балка, полимерная композиция, усиление, трещиностойкость.

#### Abstract

Results of the experimental research of crack resistance of bendable statically determinate beams reinforced by the polymer composition of permeable action during a short-term single load event are given. **Key words:** 

concrete beam, polymer composition, reinforcement, crack resistance.

Усиление и восстановление конструкций зданий и сооружений требуют поиска новых рациональных и экономически обоснованных конструктивных решений. Одним из путей предотвращения указанной проблемы является использование полимерных материалов.

Различные способы усиления железобетонных конструкций полимерными материалами отображены в [1–9].

В последнее время разработана технология усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений с использованием ряда специально разработанных полимерных материалов. Новизна технологии проникающего действия полимеров состоит в возможности создания системы усиления без нарушения статики конструкции. Для железобетонных конструкций большое значение имеет процесс появления и раскрытия трещин как для предупреждения коррозии арматуры, так и для обеспечения совместной работы бетона и арматуры. Полимерная композиция способна проникать в трещины и поры, пропитывать продукты коррозии металла и в дальнейшем предотвращать возможность ее возникновения. Стоимость полимерной композиции ниже стоимости применяемых в настоящее время композиций, компаундов и смол [10].

В лаборатории кафедры инженерных конструкций Национального университета водного хозяйства и природопользования выполнены эксперимен-

© Бабич Е. М., Довбенко В. С., 2014

тальные исследования по изучению трещиностойкости железобетонных балок, усиленных полимерной композицией. Для проведения эксперимента были поставлены серии опытов. Одна из серий состояла из девяти железобетонных балок сечением 100×200 мм и длиной 2000 мм из бетона заводского изготовления класса C20/25. Балки сечением 100×200 мм и длиной 2000 мм были ар-

мированы двумя сварными каркасами (в зоне чистого изгиба верхние монтажные и поперечные стержни не устанавливали). В продольном направлении в качестве рабочей арматуры использовали стержни диаметром 14 мм из стали класса A500C, поперечной арматуры – стержни диаметром 6 мм класса A240C с шагом 100 мм (рис. 1).



Рис. 1. Схема армирования опытных балок

Испытание всех балок проводилось на специально изготовленной установке по схеме однопролетной шарнирно-опертой балки на двух опорах (расчетный пролет 1800 мм), которые загружали двумя сосредоточенными силами F на расстоянии 600 мм от опор.

Все балки загружали ступенями приблизительно по 10 % от разрушающей нагрузки до разрушения. На каждой ступени загрузки выдержка длилась 10...15 мин. Во время выдержки снимали показания по приборам, выполняли визуальный осмотр образцов, тщательно измеряли ширину раскрытия нормальных трещин на уровне центра тяжести продольной арматуры. Измерения проводили по трем–четырем наиболее

типичным трещинам – с наибольшей шириной раскрытия. Характер трещинообразования опытных балок отображали на самих образцах с помощью маркера. В непосредственной близи с трещиной дублировали ее направление, отмечали номер и нагрузку, при которой она возникла. Ширину раскрытия трещин измеряли микроскопом МПБ-3 с ценой деления шкалы 0.02 мм; деформации бетона и арматуры – тензорезисторами с базой 50 и 20 мм, которые подключали к многоканальной тензометрической измерительной системе ВНП-8; прогибы балок и вертикальное перемещение опор – прогибомером 6ПАО с ценой деления шкалы 0,01 мм. Схема загрузки балок сосредо-

Строительство. Архитектура

точенными силами и расположение измерительных приборов приведены на рис. 2.

Балки были разделены на три группы: первая – обычные контрольные балки (марка БК), которые испытывали без усиления; вторая – балки (марка БУ), которые до начала испытаний усиливали; третья – балки (марка БВ), которые сначала подвергали нагрузкам, имитируя таким образом процесс эксплуатации конструкций. Разница между балками БУ и БВ состояла в том, что балки БУ усиливали до начала испытаний, а балки БВ предварительно нагружали, только потом усиливали.

Для усиления использовали полимерную композицию проникающего действия, которая представляет собой

мономер (однородная низковязкая жидкость светло-коричневого цвета), преобразующийся после полимеризации в полимер. При поверхностном нанесении полимерная композиция пропитывает поверхность бетона и после химического взаимодействия образует новый композиционный материал, который по своей структуре отличается от необработанной конструкции [10]. Полимеризация происходит за счет химической реакции компонентов композиции с солями, основаниями и влагой, имеющимися в составе бетона. Отвердевшая полимерная композиция превращается в прочный полимер, который является экологически безопасным, нетоксичным и негорючим продуктом.



Рис. 2. Схема расположения измерительных приборов: А, Б – боковые грани (стороны) балок; 1...8 – нумерация тензорезисторов

Поверхность бетона должна иметь открытую капиллярную структуру для проникновения полимерной композиции, следовательно, для усиления железобетонных балок БУ одна из первых операций – это подготовка поверхности. Со всех граней балок БУ было снято «цементное молочко», чтобы поверхность приобрела шероховатость. Очистку выполняли механизированным инструментом. После подготовки балок БУ к усилению полимерную композицию наносили послойно с помощью кисти, по мере ее проникновения, через каждые 10...15 мин до полного насыщения по-

верхностных слоев всех граней балок (всего три–четыре слоя). Признаком насыщения являлось образование глянцевой поверхности темно-коричневого цвета (однородное покрытие). Глубина проникновения и структурные изменения бетона, пропитанного полимерной композицией, рассмотрены в [11]. Средний расход полимерной композиции на 1 м<sup>2</sup> поверхности для балок составил 600 мл.

Балки БВ нагружали ступенями статической нагрузкой, которая составила приблизительно 0,8 от разрушающей. Далее эти балки были полностью разгружены, усилены аналогично балкам БУ. По истечении 10 сут хранения в лабораторных условиях усиленные (восстановленные) балки БВ вновь подвергали воздействию кратковременных статических нагрузок до разрушения.

Перед основными испытаниями опытных балок были определены физико-механические характеристики материалов. Образцы-кубы и призмы в возрасте 28 сут по результатам трех образцов имели прочность: кубиковую –  $f_{cm,cube} = 30,2$  МПа; призменную –  $f_{cm,prism} = 27,8$  МПа. Максимальные деформации бетона по результатам испытания образцов-призм на осевое сжатие при  $\sigma_c = f_{cm,prism}$  составили  $\varepsilon_c = 178,4 \cdot 10^{-5}$ . Усиление бетонных кубов и призм выполняли аналогично балкам. Среднее значение прочности усиленного бетона для кубов и призм составило соответственно  $f_{cm,cube} = 34,8$  и  $f_{cm,prism} = 30,9$  МПа. Максимальные деформации бетона усиленных призм на осевое сжатие при  $f_{cm,prism}$  были меньшими и  $\sigma_c$ =  $\varepsilon_c = 166, 1 \cdot 10^{-5}$ . Усиление образцов полимерной композицией повысило кубиковую и призменную прочность соответственно на 14,2 и 12,0 % (табл. 1).

|--|

Образец	Кубиковая	Призменная	Дефо	Начальный	
	прочность бетона $f_{cm,cube}$ , МПа	прочность остона <i>f<sub>cm.prism</sub>,</i> МПа	бетона при сжатии $\varepsilon_c \cdot 10^{-5}$	арматуры при растяжении $\varepsilon_s \cdot 10^{-5}$	модуль упругости бетона <i>E<sub>cm</sub>,</i> ГПа
Контрольный	30,2	27,8	178,4	274.5	20,3
Усиленный	34,8	30,9	166,1	274,5	24,6

Изучение характера трещинообразования опытных балок начинали с первой ступени загружения, особое внимание было обращено на измерения и развитие нормальных трещин и их количество. Эти измерения проводили по двум боковым граням для проверки симметричности работы балок. Для более контрастного проявления и обнаружения трещин на поверхность балок перед испытанием был нанесен слабый раствор извести.

Контрольные балки. Первые нормальные трещины в контрольных балках БК начинали возникать в растянутой зоне на участке максимального момента на первой ступени загрузки, равной 8 кН, а ширина их раскрытия составила 0,04...0,08 мм. Количество нормальных трещин на первой ступени загрузки – 14 шт. С увеличением нагрузки на каждой ступени ширина раскрытия, высота и количество трещин увеличивались. На противоположных сторонах балок БК характер развития трещин и их количество были практически одинаковыми, что свидетельствует о симметричной работе балок в своей плоскости. Максимальная ширина раскрытия трещин на девятой (последней) ступени загрузки перед разрушением при нагрузке 72 кН составляла 0,37 мм. Количество трещин с двух сторон – 45 шт., а их длина по высоте балки достигала две третьих всей высоты. Схема трещинообразования балок БК показана на рис. 3.

Разрушение контрольных балок БК произошло одновременно по растянутой и сжатой зонам вследствие достижения в арматуре напряжений условного предела текучести и выкалывания бетона сжатой зоны. Средняя разрушающая нагрузка трех балок-близнецов БК составила 79,5 кН (изгибающий момент 23,7 кН·м). Результаты испытаний приведены в табл. 2.



Рис. 3. Характер трещинообразования контрольных балок БК: а - сторона А; б - сторона Б

Марка балок	Разрушающая нагрузка, кН	Изгибающий момент, кН·м	Момент образования первых нормальных трещин, кН·м	Максимальная ширина раскрытия нормальных трещин, мм
БК	79,5	23,7	2,4	0,37
БУ	82,8	25,7	7,2	0,23
БВ	101,0	30,3	7,2	0,23

Табл. 2. Результаты испытаний опытных образцов

Усиленные балки. Трещиностойкость усиленных балок БУ была значительно выше по сравнению с балками БК. Так, первые нормальные трещины наблюдали на две ступени выше третья ступень загрузки 24 кН (изгибающий момент 7,2 кН·м). Ширина раскрытия трещин при этой нагрузке была практически минимальной и составила 0...0,01 мм. Измерения проводили по трем-четырем наиболее характерным трещинам, количество нормальных трещин на третьей ступени загрузки -8 шт. Следует отметить, что балки БУ при моменте образования трещин 7,2 кН, по сравнению с балками БК – 2,4 кН, имели количество трещин в 2 раза меньше. На каждой ступени с увеличением нагрузки ширина раскрытия, высота и количество трещин увеличивались. На десятой (последней) ступени загрузки перед разрушением при 80 кН максимальная ширина раскрытия трещин составляла 0,23 мм. Длина трещин по высоте балки была разная, большинство из них были длиной в половину высоты балки, их максимальное количество с двух сторон – 32 шт. Схема трещинообразования балок БУ показана на рис. 4.

#### a)



Рис. 4. Характер трещинообразования усиленных балок БУ: а - сторона А; б - сторона Б

Разрушение усиленных балок БУ произошло по нормальному сечению при нагрузке 82,8 кН (момент 25,7 кН·м) вследствие достижения в арматуре напряжений условного предела текучести и выкалывания бетона в середине пролета.

a)

Восстановленные балки. Балки БВ сначала однократно нагружали восемью ступенями загрузки 2F = 64 кН. При этом образовались трещины шириной раскрытия 0,2 мм. На каждой ступени загрузки процесс трещинообразования был аналогичен контрольным балкам БК, после чего балки БВ были полностью разгружены. После разгрузки были видны волосяные трещины, остаточная ширина их раскрытия была меньше цены деления микроскопа 0,01 мм, то есть можно принять, что закрывались полностью. Далее выполняли усиление полимерной композицией по такой же схеме, как и для балок БУ. Балки БВ восстанавливались и повторно испытывались статической нагрузкой.

В усиленных (восстановленных) балках БВ трещинообразование протекало иным образом. Были предположения, что при новой загрузке в этих балках начнут раскрываться старые воло-

сяные трещины. Особый интерес представлял тот факт, что до третьей ступени загрузки никакого раскрытия старых трещин не обнаружено. При этом на третьей ступени (нагрузка 24 кН) старые волосяные трещины не были раскрыты, но в других местах образовались новые трещины. Ширина раскрытия новых нормальных трещин составляла 0,02...0,06 мм. Постепенно с увеличением нагрузки новые трещины развивались и раскрывались. Старые трещины при высшей ступени нагрузки также развивались, но ширина их раскрытия была меньше новообразовавшихся. Этот факт можно объяснить тем, что полимерная композиция проникла вглубь волосяных трещин и в процессе полимеризации как бы заклеила дефекты структуры цементного камня, заполнителя и контактной зоны, связавши, таким образом, тысячами нитей различные участки бетона, повышая их трещиностойкость и сопротивление нагрузке. Сетка полимера в бетоне образовала особого рода дисперсное армирование.

Максимальная ширина раскрытия трещин на двенадцатой (последней) ступени загрузки перед разрушением при 2F = 96 кН составляла 0,23 мм. Если сравнить ширину раскрытия трещин балок БВ и БК при нагрузке 72 кН (последняя ступень загрузки балок БК перед разрушением), то она будет следующей: для балок БК – 0,37; для балок БВ – 0,18 мм. Длина трещин балок БВ достигала половины высоты балки, а их количество с двух сторон составило 31 шт. Схема трещинообразования балок БК представлена на рис. 5. Характер разрушения усиленных (восстановленных) балок БВ аналогичен балкам БУ, но только при высшей ступени загрузки. Средняя разрушающая нагрузка трех балок-близнецов БВ составила 101,0 кН (изгибающий момент 30,3 кН·м).

Результаты исследования трещиностойкости опытных балок трех групп приведены в табл. 3.



Рис. 5. Характер трещинообразования усиленных (восстановленных) балок БВ: а – сторона А; б – сторона Б

Изгибающий	Шири	на раскрытия трещи	Отношение ширины раскрытия трещин усиленных балок к контрольным		
момент, кН·м	БК	БУ	БВ	$w_{k(\text{by})}/w_{k(\text{bK})}$	$w_{k(\text{bB})}/w_{k(\text{bK})}$
0,0	0,00	0,00	0,00	_	_
2,4	0,05	0,00	0,00	_	_
4,8	0,09	0,00	0,00	_	_
7,2	0,12	0,02	0,06	0,17	0,50
9,6	0,15	0,04	0,08	0,27	0,55
12,0	0,17	0,07	0,09	0,40	0,56
14,4	0,21	0,09	0,11	0,45	0,55
16,8	0,24	0,11	0,14	0,47	0,58
19,2	0,27	0,14	0,15	0,53	0,58
21,6	0,33	0,18	0,17	0,55	0,53
24,0	0,37	0,23	0,18	0,61	0,49
26,4	_	_	0,20	_	_
28,8	-	_	0,23	_	_

Табл. 3. Трещиностойкость опытных балок

Строительство. Архитектура

На рис. 6 показаны кривые роста раскрытия трещин опытных балок в зависимости от роста нагрузки.

Экспериментально установлено, что усиление и восстановление железобетонных балок полимерной композицией уменьшает ширину раскрытия трещин до 40 %, а момент образования первых трещин отдаляется на 67 %.

Разрушение всех опытных балок было одинаковым и происходило по нормальному сечению одновременно по растянутой и сжатой зонам вследствие достижения в арматуре напряжений условного предела текучести и выкалывания бетона сжатой зоны.



Рис. 6. График развития нормальных трещин опытных балок: 1 – контрольных (БК); 2 – усиленных (БУ); 3 – восстановленных (БВ)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барашиков, В. Я. Расчет прочности железобетонных балок, усиленных эффективными материалами в растянутой зоне / В. Я. Барашиков, Э. М. Блали // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : УДУВГП, 2003. – Вип. 10. – С. 252–258.

2. Боярчук, Б. А. Характер тріщиноутворення і розкриття тріщин в експериментальних залізобетонних балках, підсилених різними способами / Б. А. Боярчук // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій : зб. наук. пр. – Львів : Каменяр, 2002. – Вип. 5. – С. 219–223.

3. Веселовский, Д. Р. Основные принципы создания мономеров для пропитки бетона / Д. Р. Веселовский, Н. В. Савицкий, Р. А. Веселовский // Строительство. Материаловедение. Машиностроение : сб. науч. тр. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – Вып. 35, ч. 1. – С. 105–108.

4. Войцехівський, О. В. Відпрацювання найбільш ефективної схеми відновлення залізобетонних балок сучасними ремонтними сумішами / О. В. Войцехівський, Т. І. Приндюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2004. – Вип. 11. – С. 357–360.

5. Золотов, М. С. Восстановление и усиление железобетонных конструкций покрытиями на основе акриловых полимеров / М. С. Золотов, М. Ю. Смолянинов // Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд : матеріали Міжнар. конф. – Харків : ХДТУБА, 2003. – Вип. 23. – С. 174–177.

6. **Конончук, О. П.** Робота нормальних перерізів згинальних залізобетонних елементів, підсилених композитними матеріалами за дії малоциклового навантаження : автореф. дис. ... канд. техн. наук / О. П. Конончук. – Львів : Львівська політехніка, 2013. – 20 с.

7. Климпуш, М. Д. Розрахунок міцності нормальних перерізів залізобетонних балок, підсилених вуглецевими полімерами / М. Д. Климпуш, В. Г. Кваша // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2007. – Вип. 15. – С. 370–376.

8. Смолянинов, М. Ю. Выносливость железобетонных изгибаемых элементов, усиленных акриловым полимерраствором, при многократно повторных нагружениях / М. Ю. Смолянинов, Л. Н. Шутенко, М. С. Золотов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : РДТУ, 2003. – Вип. 10. – С. 281–289.

9. **Хаютин, Ю. Г.** Применение углепластиков для усиления строительных конструкций / Ю. Г. Хаютин, В. Л. Чернявский, Е. З. Аксельрод // Бетон и железобетон. – 2002. – № 6. – С. 17–20.

10. Научно-инженерный центр «Адгезив» [Электронный ресурс] / Режим доступа : http : // www.adgeziv.com. – Дата доступа : 15.12.13.

11. Довбенко, В. С. Особливості структури і властивостей бетону, просоченого полімерною композицією проникаючої дії / В. С. Довбенко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2012. – Вип. 23. – С. 57–62.

#### Статья сдана в редакцию 16 января 2014 года

**Евгений Михайлович Бабич,** д-р техн. наук, проф., Национальный университет водного хозяйства и природопользования. Тел.: +38-050-142-25-04, (0362)-633-273.

**Владимир Сергеевич Довбенко,** ст. преподаватель, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. E-mail: dovbenko.v.s@gmail.com.

**Yevgeny Mikhailovich Babich**, DSc (Engineering), Prof., National University of Water Management and Nature Resources Use. Phone: +38-050-142-25-04, (0362) 633-273.

Vladimir Sergeyevich Dovbenko, senior lecturer, National University of Water Management and Nature Resources Use. E-mail: dovbenko.v.s@gmail.com

# УДК 69.934.92

# Е. М. Бабич, Й.-П. Ревинкель, С. В. Филипчук

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПОКРЫТИЕ СТАДИОНА В Г. МАГДЕБУРГЕ

## UDC 69.934.92

Y. M. Babich, J.-P. Rewinkel, S. V. Filipchyk

# AN EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE WIND LOAD ACTING ON THE ROOF STRUCTURE OF THE MAGDEBURG STADIUM

#### Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований модели стадиона в г. Магдебурге в аэродинамической трубе. Определена действительная ветровая нагрузка на покрытие и фасадные стены стадиона. Выявлен характер распределения ветровой нагрузки по поверхности покрытия трибун.

#### Ключевые слова:

аэродинамическая труба, турбулентность, ветровая нагрузка.

#### Abstract

The paper presents the results of the experimental investigations of the model of the Magdeburg stadium performed in the wind tunnel. The actual wind load on the roof structure and facade walls of the stadium has been found. The character of the distribution of wind load on the surface of the covering of stands has been determined.

#### Key words:

wind tunnel, turbulence, wind load.

В г. Магдебурге (ФРГ) в связи с увеличением количества проведения спортивных соревнований и привлечением населения к физической культуре старый стадион перестал удовлетворять потребностям и в 2005 г. был снесен. На его месте возведен новый стадион, рассчитанный на 27 тысяч зрителей (22350 сидячих и 4800 стоячих мест, 60 мест для людей с физическими недостатками, бизнес-места и места для прессы).

Новый стадион прямоугольный, в плане имеет размеры 174×138 м и максимальную высоту примерно 22 м. В горизонтальной проекции – это четырехугольник со срезанными углами. По сути, стадион состоит из двух эксплуатационных секторов. Большая часть – так называемый «холодный» сектор для зрителей, который расположен вокруг центральной части. Четырехэтажный «теплый» сектор построен в форме массивного здания с размерами в плане 42×26 м и высотой 15,7 м. Для строительства стадиона использованы в основном металлические (профильный прокат, трубы различного диаметра) и железобетонные конструкции.

При проектировании нового стадиона возник ряд сложных вопросов и, в первую очередь, выбор конструктивной пространственной системы, которая бы обеспечивала функциональное назначение стадиона и необходимую надежность в процессе эксплуатации. Важным вопросом было определение реальных нагрузок на конструкцию по-

© Бабич Е. М., Ревинкель Й.-П., Филипчук С. В., 2014

крытия трибун.

Для получения реальных ветровых нагрузок с учетом объемно-планировочных особенностей сооружения проведены опыты обдува модели стадиона в аэродинамической трубе. Модель стадиона была выполнена в масштабе M = 1:250 в основном из латуни и органического стекла.

Шесть вентиляторов нагнетали воздух в предкамеру, которая присоединялась непосредственно к каналу, длина которого составляла 6800 мм (рис. 1). С предкамеры через форсунки воздух поступал в канал (трубу), приобретая ускорение. Длина трубы разделялась на отдельные поля (камеры F). Рабочая часть имела ширину 1,78 м, высоту 0,9 м и длину 2 м. На основе воздушного канала были устроены неравенства, которые регулировали в соответствии с профилем граничного слоя ветра. Для исследований была выбрана ситуация обдува согласно пригородным схемам застройки с показателем  $a_p = 0,2$ .



Рис. 1. Схема аэродинамической трубы

Модель стадиона размещалась на измерительной площадке - поворотном столе, который располагался в измерительной камере аэродинамической трубы (см. рис. 1). Поскольку стол вращался, то угол обдува меняли от 0 до 360° (стол вращался в направлении обдува). Поток обдува под углом 0° отвечал направлению ветра с севера, а под углом 90° - с востока. В исследованиях был смоделирован атмосферный поток в масштабе М<sub>W</sub> = 1:300. Масштабы модели и турбулентности с достаточной точностью совпадали. Общий вид аэродинамической трубы с расположенной в ней моделью стадиона приведен на рис. 2.

Основным требованием к аэродинамической трубе является создание в

ней воздушных потоков, которые бы достоверно моделировали ее в естественной среде. Очередное требование моделирование профиля скорости по высоте. Как видно из рис. 3, характер распределения скорости воздуха по высоте трубы идентичен характеру распределения в природных условиях, которое рекомендует Еврокод ЕС1. На высоте 5 см скорость составляла в среднем 9 м/с, при увеличении высоты до 10 см скорость возросла до 11 м/с (на 22 %). При большей высоте интенсивность роста скорости уменьшается. Так, при высоте h = 15 см средняя скорость составила 12,2 м/с (увеличение на 10,9 %).



Рис. 2. Общий вид испытания модели здания стадиона в воздушном канале (аэродинамической трубе)

На рис. З показано изменение средней скорости воздушного потока по высоте аэродинамической трубы, которую можно описать зависимостью

# $U = 4,728h^{0,361}$ .

Важно то, чтобы профиль интенсивности продольных колебаний скорости в аэродинамической трубе совпадал с таким же профилем в окружающей среде. Такое совпадение в данном случае подтверждается экспериментальными исследованиями (рис. 4). Уровень турбулентности Ти на высоте 0,8 см составлял около 47 %, а затем уменьшался и на высоте 5 см составлял 30 %. На большей высоте значение Ти находилось в пределах 20...26 %. Это подтверждает справедливость принятия в исследованиях показателя застройки, равного  $a_p = 0,2$ .

Аэродинамическая модель здания представляла собой вертикальную поверхность с прорезями по периметру высотой 500 мм, состоящую из наклонных плоскостей покрытия трибун и внешних поверхностей трибун для зрителей (рис. 5). Такие проемы имеют положительный эффект при ветровых нагрузках: уменьшают ветровую нагрузку в связи с выравниванием давления между покрытием (крышей) и нижней его частью. Негативный эффект при ветровых штормах со стороны конька покрытия не наблюдается, т. к. противоположно расположенная конструкция покрытия дальше ускоряет этот ветер и поэтому не происходит никаких существенных ветровых воздействий.

Распределение давления по поверхности покрытия измерялось двумя типами модулей – квадратными и в форме треугольников. Модули монтировались в разных позициях на покрытии. Для определения ветрового давления на фасад в верхней части галереи было установлено еще два дополнительных модуля на разных его участках (рис. 6).



Рис. 3. Распределение скорости воздушного потока по высоте аэродинамической трубы



Рис. 4. Распределение показателя турбулентности Ти по высоте аэродинамической трубы



Рис. 5. Схема аэродинамической модели здания стадиона (в разрезе)



Рис. 6. Схема расположения измерительных модулей: MD01, MD02, MD03, MD04 – прямоугольные модули на покрытии трибун; ME01 – угловой модуль на покрытии; MF01, MF02, MF03, MF04 – прямоугольные модули на фасаде

В каждом модуле выбирались точки измерения ветрового давления, в которых размещали металлические трубки из нержавеющей стали (внутренний диаметр составлял 1 мм), торцы которых находились на одном уровне с поверхностью. На трубки изнутри надевались пластмассовые шланги с внутренним диаметром 1 мм, которые помещались в модель через отверстие во вращающемся столе и соединялись через пьезоэлектрический датчик со встроенным усилителем. Распределение воздушного давления было измерено всего в 217 точках.

Сигналы с датчиков записывали одновременно и с помощью карты «сэмпл-холд» они превращались в цифровые сигналы и хранились в компьютере. По принятой технологии сдвига фаз между сигналами давления не происходило. Выбранная система измерения позволила при реальном размере сооружения рассчитывать на ожидаемые колебания воздушной нагрузки, основанные на исследованиях в воздушном канале. Распределение давления измерялось для восьми направлений ветра (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315°). Сбор данных из скважин осуществляли с помощью компьютерной техники. Время реагирования для отдельных точек измерения избиралось таким образом, чтобы возникла стабильная средняя величина, которая достигалась примерно после 2 с измерительного времени.

Измерительная цепочка – нагнетательные скважины, измерительный шланг, переключатель мест измерения, преобразователь давления – является системой, способной к колебаниям. Поскольку давление воздуха переменное, характер частот должен соответствовать измерительной цепочке, чтобы со временем меняющееся давление могло передаваться согласно амплитуде. Поведение частоты измерительной цепочки оптимизируется, по данным Холмеса, Льюиса и Кноха, через выбор длины цепочки. В нашем случае оказалось, что частоте колебаний при давления  $n \approx 100$  Гц соотношение амплитуд составляет  $A_{mess}/A_{tatsachlich} \le 1 + 0,18 (A_{mess}$ измеренная амплитуда; Аtatsachlich - настоящая амплитуда). Из предыдущих исследований известно, что для выбранного масштаба модели и при скорости ветра в воздушном канале вне пограничного слоя U<sub>∞</sub> = 24 м/с возникают

значительные колебания давления лишь при частоте n < 100 Гц. Система измерений дает таким образом возможность при реальном размере сооружения рассчитывать на ожидаемые колебания ветровой нагрузки, основанные на исследованиях в воздушном канале.

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе, где создавалось большое количество крайних задуваний. При каждом отдельном ветровом шторме (потоке задувания) измерялось давление ветра на поверхности покрытия и выполнялся его статистический анализ. Для обработки измерений воздушной нагрузки на покрытие трибун и на стены был использован квазистатический метод в соответствии с DIN 1055-4. Наряду с обычным среднеарифметическим по времени значением фиксировались также крайние давления (максимальное и минимальное). Использовались различные точки на поверхности покрытия, которые позволили получить средний коэффициент давления, а также максимальные и минимальные крайние коэффициенты.

Как видно из рис. 7, для покрытия северной трибуны на расстоянии от конька x/L = 0.02 (L – ширина покрытия) с внешней стороны покрытия максимальное (положительное) значение коэффициента давления составило 0,04. При увеличении отношения х/L этот коэффициент несколько увеличивался до 0,21, а затем постепенно уменьшился до 0,03 (при x/L = 0,92). Минимальные (отрицательные) значения коэффициента давления практически по всей ширине от гребня по абсолютной величине увеличивались от -0,24 (при x/L = 0,02) до -1,2 (при x/L = 0,92). Средние значения коэффициента давления до x/L = 0,4 практически не менялись, после этого увеличились от -0,09 до -0,42.



Рис. 7. Изменение аэродинамического коэффициента ветрового давления в зависимости от координат его измерения: а – над покрытием; б – под покрытием; 1 – максимальные значения; 2 – минимальные значения; 3 – средние значения

На внутренней поверхности покрытия (со стороны трибун) наблюдается плавное изменение максимальных и минимальных значений коэффициента ветрового давления. При значении x/L = 0.04 максимальное значение составило 0,8, а минимальное -0,93. В середине ширины покрытия (x/L = 0,48) эти значения уменьшились соответственно до 0,18 и -0,34. После x/L = 0,48 значения коэффициентов практически стабилизировались и при x/L = 0,92 они были равными 0,03 и -0,33. Средние значения коэффициентов ветрового давления со стороны трибун менялись незначительно и находились в пределах

от -0,05 до -0,11. Такое распределение давления по поверхности покрытия имеет место и для центральной и восточной трибун. Характеристика по среднему времени распределения давления в значительной степени отражает распределение максимальных и минимальных крайних давлений. Нужно отметить, что экстремальные значения в некоторых точках несимметрично распределяются. Особенно это касается передних и задних краев покрытия трибун в так называемых «оторванных точках» потока, где намечается тенденция к снижению давления, чем превышение предела. В то же время при кратковременном воздействии существуют зоны, в которых наблюдается незначительное давление. Подобные эффекты необходимо учитывать в расчетах ветровых нагрузок.

Анализ значений измерения давления показывает, что наибольшие нагрузки (приток ветра) имеют место при направлении ветра перпендикулярно к карнизу. При направлении ветра перпендикулярно продольной оси возникают ветровые нагрузки на наветренную и подветренную длину покрытия. Ветровые нагрузки на покрытие определялись как сумма давления над покрытием и под покрытием.

При действии ветра перпендикулярно продольной оси здания стадиона в западном направлении самое ветровое давление наблюдается в карнизной зоне A (рис. 8, табл. 1).

Зона покрытия	А	D	С	D	Е	F
Ветровая нагрузка w <sub>B,res</sub> , кН/м <sup>2</sup>	-0,70	-0,60	-0,25	-0,10	-0,40	-0,20

Табл. 1. Ветровые нагрузки на покрытие трибун при воздействии ветра в западном направлении



Рис. 8. Максимальные результирующие ветровые нагрузки на покрытие трибун

На карнизном участке А шириной 3,6 м определено самое ветровое давление  $w_{B,res} = -0,70 \text{ kH/m}^2$ , на участках D и C шириной по 12 м – соответственно 0,60 и 0,25 кH/m<sup>2</sup>. У гребня (участок Е шириной 4 м) давление существенно уменьшилось и составило  $w_{B,res} = -0,10 \text{ kH/m}^2$ . На покрытии противоположной продольной трибуны возникает также существенное ветровое давление. На участке возле гребня Е шириной 5 м оно составило  $w_{B,res} = -0,40 \text{ кH/m}^2$ , а на большинстве поверхности  $w_{B,res} = -0,2 \text{ кH/m}^2$ . Во всех случаях давление является отсасывающим, т. е. действует в направлении от трибун.

Анализ измерений давления показывает, что наибольшие нагрузки возникают при обдуве, направленном перпендикулярно канту или к гребню. На рис. 9 представлены характерные зоны распределения ветровой нагрузки, когда ветер направлен перпендикулярно к оси длины (W1) и перпендикулярно к коротким сторонам здания (соответственно W2 и W3). Ожидаемые суммарные ветровые нагрузки w<sub>B,res</sub> в характерных зонах отражены в табл. 2 (без учета коэффициента надежности по нагрузке).

Приведенные в табл. 2 нагрузки – это нагрузки с учетом верхнего и ниж-

него воздушного давления. За исключением узкой полосы внешнего канта, данные воздушные нагрузки относительно невысокие. Причиной этого является тот факт, что на нижней поверхности покрытия трибун нижнее давление устанавливается согласно коэффициенту разрежения –0,15.



Рис. 9. Направления ветровых потоков и зоны их влияния на несущие конструкции покрытия трибун стадиона: W1, W2, W3 – направления воздушного потока (ветра); А, В, С, D, Е, F – зоны поверхности покрытия трибун

	Ветровая нагрузка w <sub>B.res</sub> , кПа, при направлении ветра					
зона покрытия	Ветровая нагрузка w <sub>В,гез</sub> , кПа, при н W1 W2 -0,70 -0,70 -0,60 -0,60 -0,25 -0,35 -0,10 -0,20 -0,40 -0,25 -0,20 -	W2	W3			
А	-0,70	-0,70	-0,70			
В	-0,60	-0,60	-0,55			
С	-0,25	-0,35	-0,30			
D	-0,10	-0,20	-0,20			
Е	-0,40	-0,25	-0,45			
F	-0,20	_	-0,35			

Табл. 2. Максимальная суммарная ветровая нагрузка на покрытие трибун стадиона

Наветренные стороны покрытия показывают, что уменьшение давления происходит в направлении к игровому полю. Воздушные нагрузки подветренной стороны, наоборот, почти постоянны. Причина этого заключается в том, что ненамного большее разрежение в верхней части в области канта обдува

Строительство. Архитектура

компенсируется большим разрежением в нижней. Давление в нижней и верхней частях увеличивается до внешней стороны, а коэффициент остается почти постоянным. В области угла (клина) поток ветра идет перпендикулярно водосточному желобу, что вызывает более воздушные нагрузки. На краю покрытия имеет место повышенная воздушная нагрузка ( $w_{B,res} = -0,7 \text{ к}\Pi a$ ), на другой поверхности она уменьшается.

При направлении воздушного потока параллельно коньку и в водосточном желобе поверхности покрытия подсос оказался почти постоянным и равным  $w_{B,res} = -0.3 \text{ к} \Pi a.$ 

Использованная конструкция аэродинамической трубы по своим характеристикам (распределение давления по высоте, показатели турбулентности) соответствует характеристике ветровых потоков в реальной окружающей среде для выбранного сооружения.

Исследования строения стадиона в аэродинамической трубе позволили определить действительную ветровую нагрузку на покрытие и фасадные стены стадиона. Выявлен характер распределения ветровой нагрузки по поверхности покрытия трибун.

Действительно, ветровая нагрузка на фасадные стены оказалась на 10 % меньше нагрузки, предусмотренной DIN 1055-4: 2005-03.

Установлены значения аэродинамических коэффициентов для ветровых нагрузок на поверхность покрытия, которые могут быть рекомендованы к учету при корректировке нормативных документов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ревинкель, Й.-П.** Конструктивные решения покрытия трибун стадиона в городе Магдебурге (ФРГ) / Й.-П. Ревинкель // Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. – М. : НУВХП, 2010. – Вып. 20. – С. 408–413.

2. **Ревинкель, Й.-П.** Экспериментальное определение ветровых нагрузок на конструкции покрытия трибун стадиона / Й.-П. Ревинкель // Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. – М. : НУВХП, 2011. – Вып. 21. – С. 525–531.

3. **Ревинкель, Й.-П.** Методика испытания модели рамно-ферменной конструкции покрытия трибун стадионов / Й.-П. Ревинкель, С. В. Филипчук // Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. – М. : НУВХП, 2011. – Вып. 22. – С. 716–721.

4. **Кузнецов, С. Г.** Определение ветровых нагрузок на конструкции покрытий над трибунами стадионов / С. Г. Кузнецов, О. С. Мишура // Містобудування та територіальне планування. – 2011. – № 40. – Ч. І. – С. 562–569.

5. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. – Київ : Мінбуд України, 2006. – 75 с.

6. E-DIN 1055. Einwirkungen auf Tragwerge. Teil 4 : Windlasten, Norm-Entwurd. – 2002.

## Статья сдана в редакцию 13 января 2014 года

Евгений Михайлович Бабич, д-р техн. наук, проф., Национальный университет водного хозяйства и природопользования.

Йорг Петер Ревинкель, Национальный университет водного хозяйства и природопользования.

Сергей Викторович Филипчук, канд. техн. наук, Национальный университет водного хозяйства и природопользования.

Yevgeny Mikhailovich Babich, DSc (Engineering), Prof. National University of Water Management and Nature Resources Use.

Yorg Йорг Peter Rewinkel, National University of Water Management and Nature Resources Use.

Sergey Viktorovich Filipchyk, PhD (Engineering), National University of Water Management and Nature Resources Use.

## УДК 624.012

Г. Х. Масюк, И. И. Алексиевец

# ВЛИЯНИЕ МАЛОЦИКЛОВЫХ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ПРОЦЕССЫ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ВО ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

## UDC 624.012

# G. K. Masyuk, I. I. Aleksievets

# THE IMPACT OF LOW-CYCLE ALTERNATING LOADS ON THE PROCESSES OF CRACK FORMATION IN ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE COMPONENTS

#### Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований работы внецентренно сжатых железобетонных элементов при действии малоцикловых нагрузок со знакопеременными эксцентриситетами и их влияние на трещинообразование.

#### Ключевые слова:

колонны, внецентренное сжатие, знакопеременные нагрузки, сжатие, сечение.

#### Abstract

The paper presents the results of the experimental research on the performance of eccentrically compressed reinforced concrete components under the action of low-cycle loads with alternating eccentricities and their impact on crack formation.

Key words:

columns, eccentric compression, alternating loads, compression, section.

## Введение

На данном этапе развития теории железобетона и с внедрением новых нормативных документов по расчету конструкций широкое распространение получили полные диаграммы деформирования бетона, которые и используютопределения напряженно-СЯ для деформированного состояния внецентренно сжатых элементов конструкций. Однако влияние малоцикловых нагрузок со знакопеременными эксцентриситетами в этих расчетах не отражено, поэтому весьма актуально исследование воздействия малоцикловых знакопеременных нагрузок на изменение напряженно-деформированного состояния

внецентренно сжатых железобетонных элементов и предоставление рекомендаций по их расчету. Одним из этапов исследования таких элементов является определение влияния малоцикловых знакопеременных нагрузок на процессы трещинообразования в бетоне и ширины раскрытия трещин.

# Методика экспериментальных исследований и конструкция испытуемых образцов

Объектом исследований были железобетонные колонны прямоугольного сечения с размерами 100×160×3000 мм (рис. 1 и 2). Рабочая арматура опытных образцов имела вид пространственного

© Масюк Г. Х., Алексиевец И. И., 2014

каркаса с четырьмя стержнями диаметром 12 мм периодического профиля арматуры класса А400С, расположенными в углах сечения. Продольные стержни соединялись между собой с помощью хомутов. Поперечные хомуты выполнялись из отдельных стержней диаметром 4 мм из стали Вр-I, которые соединялись между собой контактно-точечной сваркой в плоские каркасы и размещались с шагом 150 мм. Для предотвращения преждевременного разрушения торцов колонны они были усилены сетками косвенного армирования из стали Вр-I диаметром 4 мм, расположенными с шагом 50 мм. Всего было изготовлено 14 колонн.



Рис. 1. Конструкция опытных образцов (колонн): 1 – рабочая арматура; 2 – поперечные стержни; 3 – сетки косвенного армирования



Рис. 2. Опытная колонна с измерительными приборами в установке для испытания

Испытания образцов проводились в специальной опытной установке (см. рис. 2), которая позволяла создавать знакопеременные нагрузки. Величина эксцентриситета приложения силы составляла  $e_0 = \pm 10$  см. Деформации бетона и арматуры измерялись тензометрическими и механическими приборами.

Для определения уровней малоцикловой нагрузки две колонны были испытаны на одноразовую статическую нагрузку с доведением их до разрушения; остальные – на малоцикловые знакопеременные нагрузки в течение 10 циклов. Выдержка на каждом полуцикле нагрузки-разгрузки составляла 10 мин, на одиннадцатом цикле все колонны были доведены до разрушения.

Для образцов железобетонных колонн выбраны следующие режимы загрузки (рис. 3):

– испытание колонн 1К-1 и 2К-1 кратковременной нагрузкой для определения несущей способности Nc;

– испытания двух колонн 1КЗН-2 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от Ncyc = 0,3Nc – на нижнем уровне до Ncyc = 0,6Nc – на верхнем в течение 10 циклов;

– испытания двух колонн 1КЗН-3 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от Ncyc = 0,3Nc – на нижнем уровне до Ncyc = 0,8Nc – на верхнем в течение 10 циклов;

– испытания двух колонн 1КЗН-4 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от Ncyc = 0,6Nc – на нижнем уровне до Ncyc = 0,8Nc – на верхнем в течение 10 циклов;

– испытания колонн 2K3H-2 и 2K3H-3 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от Ncyc = 0 – на нижнем уровне, соответственно, к Ncyc = 0,65Nc и Ncyc = 0,85Nc на верхнем в течение 10 циклов;

– испытания двух колонн 2КЗН-4

малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от Ncyc = 0 – на нижнем уровне до Ncyc = 0,65Nc и Ncyc = 0,85Nc – на верхнем с очередностью через один цикл;

– испытания двух колонн 2КЗН-5 малоцикловой нагрузкой со знакопеременным эксцентриситетом в режимах от Ncyc = 0 – на нижнем уровне до Ncyc = 0,1Nc...Ncyc = 1,0Nc – на верхнем с приростом нагрузки на 0,1Nc на каждом цикле.

# Результаты испытаний

На каждом этапе загрузки вместе с другой информацией фиксировалось образование трещин, а также глубина их проникновения и распространения. Поскольку цель работы непосредственно связана с изучением трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов, большое внимание было уделено моменту образования трещин, глубине их проникновения и ширине раскрытия. Качественные параметры упомянутых величин, как и прогибов, достаточно тесно связаны с характером изменения продольных деформаций по длине элемента, поэтому особенности развития деформаций материалов и факторы, от которых они зависят, вполне могут быть отнесены и к закономерностям образования трещин.

Наличие в сечении растянутой зоны, а также достижение в ее крайних волокнах предела растяжения бетона – необходимые условия возникновения трещины.

При испытании внецентренно сжатых колонн 1К-1 и 2К-1 одноразовыми статическими нагрузками, наряду с нарастанием прогибов, которые были максимальными посредине образцов, начали появляться первые горизонтальные трещины в растянутой зоне. В момент разрушения колонн ширина раскрытия самой развитой трещины достигала почти 0,6 мм.



Рис. 3. Режимы испытания опытных образцов колонн

При внецентренно испытании сжатых железобетонных колонн малоцикловой нагрузкой проводилось наблюдение не только за появлением трещин, но и за их развитием. С возникновением первых трещин в растянутой зоне прирост деформаций значительно возрастал. Момент образования трещин определялся с помощью тензорезисторов, наклеенных на растянутой грани колонны, а также визуально с использованием ацетона. Смочив поверхность растянутой грани бетонного образца ацетоном, в момент появления трещины хорошо видно ее очертание. Попадая в микротрещину, он оставляет четкий след по всей ее длине. Такой способ позволил визуально определять момент возникновения трещин на дветри ступени раньше, чем невооруженным глазом.

Более точно момент появления трещин определялся с помощью тензорезисторов. К моменту образования микротрещин увеличение деформаций тензорезисторов на каждой ступени нагрузки было почти одинаковым, что свидетельствует о сравнительно равно-

мерном растяжении бетона. В момент появления трещин тензорезистор, через который они проходили, показывал резкое увеличение деформации растяжения, а соседние тензорезисторы – увеличение деформаций противоположного знака. Первые трещины в растянутой зоне бетона возникали, как правило, в средней трети образца. С ростом нагрузки происходило углубление и раскрытие этих трещин, между ними образовывались новые трещины, которые быстро развивались. Незадолго до пятого-шестого циклов малоциклового нагружения процесс трещинообразования практически угасал, хотя глубина проникновения нормальных трещин увеличивалась.

Первые микротрещины во всех колоннах, которые испытывались на малоцикловые знакопеременные нагрузки, появлялись уже на первых циклах загрузки при уровнях 0,2...0,3 от разрушительного (рис. 4). Можно констатировать, что на первом цикле разгрузки колонн первой серии часть трещин остались раскрытыми в результате неполного снятия нагрузок и раздроб-

опорам.

тервал между смежными трещинами

для всех колонн был примерно одного

значения, а глубина их проникновения

уменьшалась от середины элементов к

Рис. 4. Развитие трещин и характер выкалывания бетона в колоннах марок: а – 1КЗН-3; б-2КЗН-3; в-2КЗН-4

Экспериментально было установлено, что появление новых, увеличение и раскрытие уже существующих трещин наблюдалось за первые пять-шесть циклов малоциклового нагружения колонн марок 1КЗН-2, 1КЗН-3, 1КЗН-4, 2КЗН-2, 2КЗН-3, 2КЗН-4, а в дальнейшем проходила их стабилизация.

В частности, в колоннах марки 1КЗН-3, которые испытывались на малоцикловые нагрузки В режиме  $\eta = 0,3...0,6$  с догрузкой на пятом цикле к η = 0,8, ширина раскрытия самой большой трещины на верхнем уровне пятого цикла составляла w<sub>k</sub> = 0,24 мм (рис. 5).

На шестом цикле при снижении нагрузки до уровня, соответствующего η = 0,6, ширина раскрытия составляла w<sub>k</sub> = 0,17 мм и стабилизировалась на последующих циклах, т. е. после шестого цикла процесс трещинообразования практически завершился (см. рис. 5). В общем, на верхнем уровне прирост ширины раскрытия трещин между десятым и шестым циклами составил 63,6 %, на нижних уровнях – 66,7 %.





a)

мешало их закрытию.

ления бетона в зоне трещин, что и по-

местах их скопления колебалось в пре-

делах 5...8 см и фиксировалось практи-

чески от опоры к опоре, к тому же ин-

Расстояние между трещинами в

б)



Рис. 5. Развитие ширины раскрытия трещин в колоннах марки 1КЗН-3

В табл. 1 приведены результаты величины ширины раскрытия наиболее опасной трещины на верхних уровнях малоцикловых знакопеременных нагрузок по всем колоннам. Как прогнозировалось, что и видно из результатов испытания, существенное раскрытие трещин практически во всех колоннах наблюдалось до пятого-шестого циклов, после чего возникала определенная стабилизация. В колоннах марки 2КЗН-5 раскрытие трещин на циклах загрузки происходило по линейным зависимостям, поскольку нагрузка проводилась равными ступенями до полного разрушения элементов.

Марка колонн	Ширина раскрытия трещин на циклах w <sub>k</sub> , мм										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1K-1		0,6 (при разрушении)									
1K3H-2	0,09	0,11	0,13	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,41
1K3H-3	0,1	0,12	0,14	0,16	0,24	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,39
1K3H-4	0,1	0,11	0,13	0,13	0,15	0,22	0,23	0,23	0,24	0,25	0,44
2К-1		0,57 (при разрушении)									
2КЗН-2	0,11	0,13	0,13	0,16	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,38
2КЗН-3	0,14	0,17	0,19	0,21	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,45
2КЗН-4	0,1	0,18	0,1	0,2	0,11	0,25	0,12	0,25	0,12	0,25	0,44
2КЗН-5	_	_	0,06	0,08	0,1	0,15	0,19	0,26	0,34	0,45	0,50

Табл. 1. Ширина раскрытия наиболее опасной трещины на верхних уровнях по циклам малоцикловой нагрузки

Если анализировать рис. 4, то можно заметить, что проникновение трещин во всех колоннах без исключения максимально глубоко происходило в середине сечения колонны, т. е. максимальная длина трещин в наиболее опасном сечении, посредине колонны, составляла 10...12 см, а с приближением к опорам уменьшалась.

Практически во всех колоннах в стадии разрушения наблюдалось пластинчатое выкалывание сжатого бетона (образование лещаток). Многие исследователи, в частности, В. И. Бабич, А. Н. Бамбура, связывают это явление с работой нисходящей ветки диаграммы напряжений. В свою очередь возникновение лещаток свидетельствует о разрушении сжатой зоны бетона. Таким образом происходит как бы разрушение части сжатой зоны бетона, т. е. выключение его из работы, хотя это проходит без разрушения самого образца.

Процесс образования трещин вполне аналогичен описанному исследователями Ю. В. Гарницким, Л. Н. Геништою, В. И. Клименком, В. И. Мурашовым. Сначала возникает трещина в месте максимального изгибающего момента. С увеличением нагрузки она начинает развиваться вместе с образованием новых трещин по длине образца. Появление новых трещин происходит до определенного момента, после чего начинает раскрываться наиболее опасная трещина одновременно с образованием лещаток в сжатой зоне. В таком состоянии дальнейшее незначительное увеличение нагрузки или выдержка под нагрузкой приводят к разрушению.

Для сравнения ширины раскрытия

экспериментально зафиксированных трещин определим их ширину раскрытия по действующим нормативным документам.

Согласно [1, 2] ширину раскрытия трещин определяем по выражению

$$\mathbf{w}_{k} = \mathbf{s}_{r,\max}(\boldsymbol{\varepsilon}_{sm} - \boldsymbol{\varepsilon}_{cm}), \qquad (1)$$

где  $S_{r,max}$  – максимальный шаг трещин;  $\varepsilon_{sm}$  – средние деформации в арматуре;  $\varepsilon_{cm}$  – средние деформации бетона между трещинами.

Ширина раскрытия трещин ограничивается действующими нормативными документами с учетом функционального характера конструкций и их эстетического вида. Рекомендуемые величины ширины раскрытия W<sub>max</sub> зависят от условий окружающей среды, в которых осуществляется эксплуатация конструкций, и минимального класса бетона по прочности на сжатие. Для случая 5.11 нашего [2, табл.  $w_{max} = 0,3$  MM.

Результаты сравнения нормативных и экспериментальных значений ширины раскрытия трещин приведены в табл. 2.

Марка колонны	Режим нагрузки	w <sub>k,сус</sub> , мм	w <sub>k</sub> , мм [1]	W <sub>max</sub> , MM	$W_{k,cyc}$ / $W_k$ , %
1K3H-2	0,30,6	0,16	0,11	0,3	45,5
1K3H-3	0,30,6 0,30,8 (5 цикл)	0,17			54,5
1K3H-4	0,30,6 (15 циклы) 0,30,8 (610 циклы)	0,22			100
2КЗН-2	00,65	0,18	0,11	0,3	63,6
2КЗН-3	00,85	0,24			118,2
2КЗН-4	00,65 (a) 00,85 (б)	0,25			127,3
2K3H-5	От 00,1 до 01,0	0,19			72,7

Табл. 2. Сравнение нормативных и экспериментальных значений ширины раскрытия трещин

Здесь значения ширины раскрытия трещин, определенных экспериментально, занесены с шестого цикла малоцикловой знакопеременной нагрузки, а для колонны 2КЗН-5 значение седьмого цикла соответствует эксплуатационному уровню.

Как видно из табл. 2, малоцикловые знакопеременные нагрузки существенно влияют на ширину раскрытия трещин во внецентренно сжатых железобетонных элементах. В частности, при уровнях нагрузок, которые не превышают или близкие к эксплуатационным уровням  $\eta = 0,6...0,65$ , ширина раскрытия трещин увеличивается на 45,5...63,6 %. При более высоких уровнях нагрузок, до  $\eta = 0.85$ , ширина раскрытия трещин увеличивается практически в 2 раза и составляет 100...127,3 %, по сравнению с шириной раскрытия трещин, определяемых по нормативным документам [1, 2]. Однако следует отметить, что во всех случаях ширина раскрытия трещин не превышает их предельных значений. Превышение происходило в момент, близкий к разрушению, при догружении колонн на одиннадцатом цикле загрузки.

Анализируя полученные экспериментальные данные, можно утверждать, что влияние малоцикловых знакопеременных нагрузок на ширину раскрытия трещин нужно учитывать с коэффициентом  $\gamma_{w,cyc}$ , который будет отражать реальную работу конструкций при таких видах нагрузки. Тогда формулу (1) можно представить в виде

$$w_{k} = \gamma_{w,cyc} s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}). \qquad (2)$$

Для экспериментальных внецентренно сжатых элементов коэффициент следует принимать: при нагрузках на верхних уровнях  $\eta = 0,6...0,65$  $\gamma_{w,cyc} = 1,6$ ; при  $\eta = 0,8...085$  $\gamma_{w,cyc} = 2,0$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкция зданий и сооружений. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Киев : Минрегионстрой Украины, 2011. – 71 с.

2. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Бетонные и железобетонные конструкции из тяжелого бетона. Правила проектирования. – Киев : Минрегионстрой Украины, 2011. – 118 с.

3. **Масюк, Г. Х.** Расчет прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов при действии малоцикловых нагрузок с знакопеременными эксцентриситетами с применением деформационной модели / Г. Х. Масюк // Ресурсосберегающие материалы, строительные конструкции, здания и сооружения : сб. науч. тр. – Ривне : НУВХП, 2013. – Вып. 25. – С. 330–335.

4. Бабич, Е. М. Бетонные и железобетонные элементы в условиях малоцикловых нагрузок : монография / Е. М. Бабич, Ю. А. Крусь. – Ривне : Ровен. гос. техн. ун-т, 1999. – 119 с.

#### Статья сдана в редакцию 10 января 2014 года

**Григорий Харитонович Масюк,** канд. техн. наук, проф., Национальный университет водного хозяйства и природопользования. E-mail:gmasyuk@mail.ua.

Иван Иванович Алексиевец, ассистент, Национальный университет водного хозяйства и природопользования. E-mail: ivanalekseevec@rambler.ru.

Grigory Kharitonovich Masyuk, PhD (Engineering), Prof., National University of Water Management and Nature Resources Use. E-mail: gmasyuk@mail.ua

**Ivan Ivanovich Aleksievets,** assistant lecturer, National University of Water Management and Nature Resources Use. E-mail: ivanalekseevec@rambler.ru.



УДК 911.375.62: 911.375.5

А. Ю. Скриган, Е. С. Задереев, И. В. Шилова

# СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ В ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЕ КРАСНОЯРСКА

UDC 911.375.62: 911.375.5

A. Y. Skryhan, E. S. Zadereyev, I. V. Shilova

# SOCIALIST LEGACY IN THE SPATIAL STRUCTURE OF KRASNOYARSK

#### Аннотация

Рассмотрено формирование морфологической и функциональной структур Красноярска в социалистический период, влияние социалистических элементов пространственной структуры на современные проблемы города. Проанализированы специфические особенности социалистического города и их выраженность в Красноярске.

#### Ключевые слова:

урбанистика, городская среда, морфологическая и функциональная структура, социалистический город, проблемы городского развития.

## Abstract

The formation of the morphological and functional structure of Krasnoyarsk in the socialist period and the influence of socialist elements of the spatial structure upon the current problems facing the city are considered; the specific features of a socialist city and their implementation in Krasnoyarsk are analyzed.

# Key words:

urban geography, urban environment, morphological and functional structure, socialist city, problems of urban development.

#### Введение

Город представляет собой диалектическое взаимодействие общества и пространства [1]. При этом пространственная структура города изменяется существенно медленнее всех остальных элементов городской среды, выступая своеобразной инвариантной основой городского ландшафта [2].

Городские «биографии» формируются экстраординарными и зачастую катастрофическими событиями, такими как войны, восстания и перевороты, эпидемии и стихийные бедствия. В XX в. ярким отпечатком в пространст-

© Скриган А. Ю., Задереев Е. С., Шилова И. В., 2014
венной структуре многих городов мира стал период социализма. Феномен социалистического города возник как следствие идеологического противопоставления социалистического общественного строя капиталистическому. Под воздействием общественной идеологии архитекторы и планировщики в СССР обосновывали идею социалистического города. В 1930 г. вышла работа Н. А. Милютина [3], на долгие годы определившая доминирующую парадигму в планировке и развитии советских городов. Классической западной работой, посвященной изучению социалистического урбанизма, является книга Френча и Гамильтона [4].

В урбанистике активно обсуждаются принципиальные отличия между социалистическим и капиталистическим городом. Многие урбанисты утверждают, что коллективная собственность и централизованное планирование формируют кардинальное отличие социалистического города от капиталистического [5]. Однако в последние годы среди них бытует мнение, что принципиальных отличий между капиталистическим и социалистическим городом не существует, они не зависят от политического строя [6], а общественно-политическая формация имеет второстепенное воздействие и только корректирует динамику городской морфологии.

Исследования феномена социалистического города, процессов трансформации после распада социалистической системы показывают, что особенности «постсоциалистического» города географически наблюдаются в Восточной и Центральной Европе, в первую очередь, в столицах – Будапеште, Праге, Варшаве, Таллинне, Москве [7]. Публикаций, посвященных нестоличным городам с социалистическим прошлым, недостаточно. Тем не менее анализ пространственной структуры городов, невыполняющих специфические столичные функции и подверженных процессам интернационализации городской среды в меньшей степени, является актуальной задачей в изучении общих закономерностей динамики городской среды и ее особенностей, связанных с политическими и социальноэкономическими условиями.

В качестве объекта исследования был выбран город Красноярск – крупный индустриальный город в Восточной Сибири с достаточно продолжительной предсоциалистической историей развития. Целью исследования являлось: изучить морфологическую и функциональную структуры Красноярска, сформированные в социалистический период; проанализировать влияние социалистиэлементов пространственной ческих структуры на современное развитие города; оценить, являются ли современные проблемы развития Красноярска наследием социалистического прошлого или выступают типичными «трудностями роста» любого города.

# Материал и методы исследования

Анализ пространственной и функциональной структур Красноярска, процессов постсоциалистической трансформации был осуществлен на основе проведенных полевых исследований в июле 2013 г. Исследования включали анализ картографического материала (Генерального плана города и приложений к нему), интервью с А. Шаталовым (главным архитектором ОАО «ТГИ Красноярскгражданпроект»), интервью Подопригорой (директором с Ю. ООО «Рекламно-информационная группа «Андрей Дубенский», членом Общественного совета при Министерстве строительства и архитектуры Красноярского края), обработку официальных статистических данных. Использованы также аналитические обзоры агентств недвижимости Красноярска (RWAY, «Коммерческая недвижимость Красноярска»), интервью в средствах массовой информации с А. Тихоновым (исполнительным директором Союза Строителей Красноярского края).

Пространственная структура города изучалась с помощью картографического, статистического методов и метода полевых исследований (распространение, морфологические особенности и динамика функциональных зон различного назначения), интервью были использованы для выявления современных проблем развития города, сравнительный географический метод – для анализа влияния социалистического наследия на современные проблемы городского развития.

### Красноярск: особенности морфологической и функциональной структур

Красноярск был основан в 1628 г. казаком А. Дубенским [8]. Из предсоциалистической истории города необходимо отметить следующее:

в результате пожара 1773 г. в городе уцелело только около 30 строений.
Восстановление Красноярска осуществлялось под руководством П. Моисеева, заложившего линейную планировку петербургского типа [9];

 получение статуса губернского города в 1822 г. повлекло за собой разработку первого перспективного плана развития города, осуществленного В. Гесте.
Этот план унаследовал регулярную линейную планировку XVII в. [9];

– «золотая лихорадка» в середине XIX в. способствовала бурному экономическому росту региона и города. Возросшие доходы и благосостояние жителей привели к появлению в городе элементов комфортной и богатой жизни [8];

введение в эксплуатацию Среднесибирского участка Транссибирской магистрали в 1895 г. способствовало миграции населения из европейской части России в Сибирь, освоению ее природных богатств и экономическому развитию региона.

Начало социалистического перио-

да не привнесло кардинальных изменений в пространственную структуру города. Важнейшим событием, во многом сформировавшим современный облик города, стала Вторая мировая война. В 1941 г. в Красноярск было эвакуировано 23 предприятия с европейской части Советского Союза. Для обеспечения жильем работников строились землянки, деревянные одно- и двухэтажные бараки на прилегающих к цехам территориях [10]. После окончания войны предприятия остались в Красноярске, более того, многие из них сохранили «военный» профиль. Сохранились и бараки. По данным статистики в 1950 г. в бараках проживало около 35 тысяч красноярцев [9].

Вторая волна индустриализации Красноярска началась в 1960-е гг. Именно тогда был сформирован промышленный профиль города, заложены многие градообразующие предприятия. Реализация грандиозных промышленных проектов требовала значительных материальных и людских ресурсов и вызвала огромные миграционные потоки из европейской части Советского Союза в Сибирь. Значительная доля приезжающих оставалась в городе на несколько лет. Постепенно среди населения сформировался менталитет «временщика», приехавшего на недолгий период времени и поэтому не нуждающегося в долгосрочных социальных проектах. Приоритет промышленного социалистического строительства над неустроенным бытом нашел свое отражение в нехватке жилья и объектов социальной инфраструктуры.

Современный Красноярск делится на семь административных районов, расположенных на левом и правом берегах Енисея, протянувшись более чем на 30 км вдоль реки. Город некомпактен, его площадь составляет 359,3 км<sup>2</sup> (2012) [8], расстояние между микрорайонами достигает 7...8 км. На этих пространствах располагаются промышленные зоны, пустыри, лесопарки и т. д. По меткому выражению А. Шаталова, в настоящее время Красноярск представляет собой разбросанные в пространстве и мало связанные между собой «индустриальные деревни», ядром которых выступает предприятие, окруженное жилыми массивами.

Город продолжает разрастаться вширь, несмотря на естественные геолого-геоморфологические ограничения и дополнительные затраты на создание инженерной инфраструктуры. Современные причины территориальной экспансии города связаны в первую очередь с возможностями инвесторов и застройщиков приобретать участки земли для строительства. По словам Ю. Подопригоры, свободных участков в городе, особенно в центре, нет, земельные аукционы не проводились несколько лет. Участки в центре города не выставляются на аукцион в том числе и потому, что, по словам А. Тихонова [11], четкого механизма реновации застроенных территорий в городе не разработано.

При этом типичного процесса субурбанизации не происходит. Активному оттоку населения в пригородные территории препятствуют высокие затраты на содержание индивидуальных домов. В соответствии с действующим Генеральным планом города северозападные и юго-западные окраины являются районами, предназначенными для коттеджной индивидуальной застройки. В черте города за 2012 г. было построено 105 домов обшей плошалью тыс. м<sup>2</sup>, преимущественно 22,4 в поселке Удачный (20,5 тыс. м<sup>2</sup>) [12]. Городские власти планируют увеличить число вновь строящихся малоэтажных индивидуальных домов, однако для этого требуется разработка четких механизмов, стимулирующих этот вид жилого строительства.

На сегодня в городе преобладают многоквартирные дома, построенные в 1971...1995 гг. – 47 % [13]. Также многочисленны крупные массивы пятиэтажных домов конца 1950-х и 1960-х гг. («хрущевки»), которые сосредоточены на правом берегу Енисея и в центре города. Моральный и физический износ строений, а также миграция населения после закрытия предприятий способствуют активной маргинализации и геттизации таких микрорайонов. Уже сейчас большую часть населения в них составляют малообеспеченные категории, зачастую без работы. В этих микрорайонах проживает значительная доля иммигрантов, выходцев из Центральной и Восточной Азии.

«Хрущевки» играют значительную роль на местном вторичном рынке жилья. Цены на них в Красноярске сопоставимы с ценами на жилье экономкласса в новостройках [14]. Конкурентоспособность «хрущевок» связана с их маленькой площадью и, следовательно, меньшей стоимостью, а также расположением в центральных частях города. Специалисты прогнозируют изменение ситуации в будущем. По мнению Ю. Подопригоры, через несколько лет стоимость такого жилья может резко снизиться. Во-первых, первичный рынок уже среагировал на спрос на малогабаритное жилье, которое начало активно строиться. Очевидно, что его эксплуатационные характеристики значительно выше, и это может компенсировать фактор расположения новых квартир на периферии города. Во-вторых, ипотека на покупку квартиры возможна, если степень износа зланий составляет менее 50 %. Многие «пятиэтажки» Красноярска близки или перешагнули этот барьер и, соответственно, выбыли из участия на рынке вторичного жилья.

Городские власти не имеют специальной политики по реабилитации и регенерации таких районов. Меры по реконструкции «хрущевок» носят точечный и нерегулярный характер. Учитывая площади такой застройки в городе, через несколько лет его администрация столкнется с многочисленными проблемами, связанными не только с износом зданий и инженерной инфраструктуры, но и с усилением социальной напряженности и обострением криминогенной обстановки.

По данным аналитического агентства RWAY [15] наибольшее количество нового жилья вводится в Центральном районе – 25 % всех построенных квартир, поступивших на первичный рынок. Доли Кировского, Железнодорожного, Свердловского, Советского и Октябрьского районов приблизительно одинаковы и составляют от 14 до 17 %. Новостройки в Ленинском районе единичны, что связано с удаленностью от центра города и большим количеством промышленных зон.

Крупнейшими строительными проектами в городе в настоящее время являются микрорайоны Покровский, Южный берег, Эдельвейс, Пашенный и Ястынское поле. Строительство крупных микрорайонов, как и в советское время, – основной способ застройки. Унаследован не только способ застройки жилой зоны, но и проблемы социалистического города - недостаток объектов социальной инфраструктуры - в первую очередь детских садов, школ, поликлиник и больниц. В будущем нехватка объектов социальной сферы может стать основной причиной неудовлетворенности жизненными условиями местным населением и, как следствие, вызвать миграции. Несмотря на предпринимаемые усилия, администрации города до настоящего времени не удалось предложить эффективного решения этой проблемы.

Крупные массивы частного сектора в центре Красноярска представлены районами Николаевка и Покровка, многие дома которых отнесены к категории ветхих и аварийных. В настоящее время в двух районах начато масштабное строительство многоэтажных жилых домов.

В центре Красноярска сохранились строения XIX – начала XX вв., большинство из которых находится в неудовлетворительном состоянии. Центр города представляет собой эклектику архитектурных стилей разновозрастной застройки. Город не имеет своего «исторического ядра». В центре нет пешеходных зон, общественные места для отдыха, прогулок и социальных коммуникаций ограничиваются набережной Енисея и Стрелкой.

У местных властей нет четко выработанной политики в отношении центра города. Так как продажа муниципальной собственности является основным источником пополнения местного бюджета, а цены на земельные участки и собственность в центре города всегда высоки, городские власти зачастую реализуют проекты, которые приносят прибыль в бюджет в ущерб историческому облику города, общественным пространствам, пешеходным коммуникациям и паркам.

Промышленные зоны Красноярска занимают около 30 % его территории. Часть промышленных предприятий продолжают свое функционирование, другая часть находится в заброшенном состоянии. Площади закрытых предприиспользуются для жилищного ятий строительства, торгово-развлекательных комплексов (например, «Торговый квартал на Свободном»), но основным направлением использования является организация складских хозяйств и разнообразных мелких обрабатывающих производств. Около 42 % предложений на рынке складских помещений приходится на Ленинский район [16], 80 % помещений относятся к классам С и D. Модернизация, инвестирование в перепрофилирование и переоборудование старых промышленных зон является актуальной задачей городского развития. Город нуждается в продуманной политике не только привлечения инвестиций, но и предоставления необходимой инфраструктуры инвесторам либо условий для ее строительства и / или оборудования.

Рынок офисной и коммерческой недвижимости является одним из наиболее развитых сегментов рынка нежилой недвижимости Красноярска [16]. Офисные центры сосредоточены в Центральном (20%) и Октябрьском (23%) районах – там, где концентрируется деловая активность города. Самые дорогие офисные помещения расположены в районе города, ограниченного улицами К. Маркса, Ленина, Профсоюзов и Белинского (часть Центрального и Железнодорожного районов). Выбор офисных помещений в Красноярске относительно невелик, преобладают офисные помещения классов С и D.

В городе существует развитая сеть крупных торговых центров, но наиболее популярным типом торговых помещений выступает стрит-ритейл – небольшие магазины, расположенные на первых этажах зданий. Центральные улицы города сосредотачивают бутики и дорогие магазины, в жилых микрорайонах распространены товары и услуги повседневного спроса. Площадь помещений формата стрит-ритейл в Красноярске – около 200 000 м<sup>2</sup>, максимальное количество предложений приходится на самый крупный район города – Советский (42 %) [16].

Общая площадь зеленых насаждений в 2009 г. составила 8139 га (23 % площади города), из которых городские леса занимают 7008 га, лесопарки – 665 га [13]. Крупные лесные массивы сконцентрированы преимущественно на юге (Столбы), юго-западе (Березовая роща), в центре города – о. Отдыха и о. Татышев. Национальный парк «Столбы» является одним из наиболее привлекательных мест для туризма с хорошо развитой инфраструктурой. Существуют планы по благоустройству о. Татышев. Остальным зеленым территориям уделяется существенно меньше внимания. Например, центральный парк города и Березовая роща находятся в запущенном и неухоженном состоянии. Общегородского каркаса зеленых насаждений не существует, развитию и поддержанию зеленых зон, как важнейшего элемента экологической устойчивости, не уделяется должного внимания ни планировщиками, ни городскими властями.

Проблемы транспортного сообщения в Красноярске стоят очень остро. Во-первых, город некомпактен, жителям необходимо постоянно совершать поездки на большие расстояния. Вовторых, общественный транспорт города не удовлетворяет потребности населения ни по качественным, ни по количественным показателям. В-третьих, рост благосостояния и большие возможности по приобретению личного автотранспорта (по сравнению с советским периодом) неизбежно привели к автотранспорта росту частного с 64,4 автомобиля на 1000 жителей в 1990 г. до 262,1 – в 2011 г. [17]. Пропускная способность улиц, их линейная планировка, а также количество парковочных мест оказались недостаточными, чтобы обеспечить перемещение такого количества личных автомобилей. Город нуждается в перестройке дорожной сети с линейной на радиальную, в новом мосте через Енисей. Местными властями уделяется много внимания транспортной проблеме города, в частности, начато строительство четвертого моста через Енисей. Однако расширение улиц и перестройка дорожной сети осуществляются медленными темпами, с каждым годом все в большей степени обостряя транспортную проблему.

#### Красноярск: социалистическое наследие и современные проблемы

В [4, 5, 18–22] сформулированы специфические особенности социалистического города. Исходя из вышеизложенной характеристики Красноярска проанализируем, насколько данные особенности типичны для города, ограничивают ли они современные рост и

Охрана труда. Охрана окружающей среды. Геоэкология развитие, и насколько нынешние проблемы города являются социалистическими по своей природе.

К специфическим особенностям морфологической и пространственной структур социалистического города принято относить следующие.

1. Особое значение центра города. Центр социалистического города выполнял идеологические и административные функции. Он был насыщен открытыми и публичными пространствами с многочисленными памятниками и монументами, предназначенными для выражения торжества идей коммунистической партии. В то же время здесь концентрировались предприятия торговли и обслуживания населения, театры, музеи и выставочные залы. Зачастую центр города включал также жилую и индустриальную застройку. Если город не был построен «с нуля», жилая застройка его центра имела предсоциалистический возраст, включая многопамятники архитектуры, численные инженерная инфраструктура и состояние которых, как правило, были неудовлетворительными.

Особое значение центра характерно для любого города, спецификой социалистического города является не столько концентрация объектов социальной структуры, сколько их административно установленное количество и место размещения. Неблагополучное состояние жилых домов и инженерной инфраструктуры в центрах городов также не представляет собой сугубо социалистическую проблему. Ниши упадка, своеобразные гетто, распространены во всех крупных городах по всему миру, а проблема регенерации и реновации таких микрорайонов является актуальной задачей городских властей, архитекторов и планировщиков от Нью-Йорка, Лондона до Варшавы, Будапешта и Софии.

В центре Красноярска сохранились практически все элементы времени тор-

жества социализма – памятники и монументы, площади, парки. Социалистические лозунги замещены на рекламу транснациональных корпораций, количество разнообразных магазинов, кафе, выставочных залов, кинотеатров резко увеличилось, место их расположения диктуется рынком и функционированием института частной собственности. Еще одним следствием функционирующего рынка является сокращение общественных пространств и зеленых насаждений в центре города. Проблемы устаревшей инженерной инфраструктуры, реновации застроенных территорий приобрели более острое выражение в постсоциалистический период, также как формирование узнаваемого «исторического ядра» города как коммерческого бренда в конкурентной борьбе с другими городами за инвестиции и туристов.

Дисперсное 2 распределение крупных парков и других общественных пространств по всей территории города – от центра до периферии, в противоположность западному городу, в котором общественные пространства, как правило, невелики и практически отсутствуют в центре. Хирт утверждал: «Большие зеленые зоны - одна из самых положительных черт строительного наследия социалистического периода» [18]. Тем не менее ландшафтному дизайну зеленых территорий не уделялось должного внимания, многие из них имели запущенный и неухоженный вид.

Социалистическое наследие в виде крупных зеленых зон в Красноярске полностью сохранено, также как их запущенность и неухоженность. Местные жители гордятся до сих пор хорошо сохранившимися живописными природными ландшафтами города, в то время как городские власти, архитекторы и планировщики не используют в полной мере это явное преимущество.

3. Некоторыми исследователями (например, [19]) в качестве особенности социалистического города выделяется

масштаб реализуемых проектов. Утверждение, что грандиозные проекты являются атрибутом социалистического города, спорно. Сокращение строительства крупных объектов после распада социалистической системы, скорее всего, было обусловлено экономическим кризисом. Экономический рост постсоциалистических городов, наблюдающийся в последние годы, привел, в том числе, к реализации значительных архитектурных и строительных проектов. Например, в Братиславе были построены Кемпинский отель, Ривер Парк, инженерная инфраструктура для защиты от паводков на Дунае.

4. Крупные промышленные зоны, пронизывающие ткань города от центра к периферии. Авторы многочисленных публикаций, исследующих трансформации постсоциалистических городов, указывают, что в социалистических городах площади индустриальных зон были непропорционально велики по сравнению с западными городами (например, [4, 5, 18, 19]).

Действительно, промышленные зоны в Красноярске занимают 30 % его территории. В результате деиндустриализации, произошедшей после развала Советского Союза, прекратили свое существование многие промышленные гиганты. В настоящее время их насчитывается меньше десятка. Территории закрытых предприятий, с одной стороны, требуют затрат на модернизацию или реновацию, с другой – предоставдополнительные возможности ляют развития вследствие своего географического расположения и наличия всех инженерных коммуникаций.

Проблему старых промышленных зон также затруднительно назвать сугубо социалистической. С ней столкнулись все города, перешагнувшие из индустриальной в постиндустриальную стадию развития.

5. Жилые зоны, представленные микрорайонами высокоэтажной крупно-

панельной плотной застройки по периферии города. В противоположность западному городу, который «расползается» в пригородные зоны, социалистический город имел четко выраженную границу в пространстве. Если в типичном западном городе этажность застройки и плотность населения постепенно снижаются от центра к окраинам, в социалистическом городе, наоборот, возрастают [18, 20-22]. Микрорайоны обеспечивались минимальной социальной инфраструктурой. Количество школ, детских садов, поликлиник, магазинов определялось расчетным числом жителей микрорайона, а их размещение - возможностью пешеходной доступности объектов социальной инфраструктуры.

Современный Красноярск полностью соответствует традиционному социалистическому подходу к строительству крупных жилых микрорайонов с домами высокой этажности и минимальным развитием социальной инфраструктуры. С одной стороны, с проблемой массового строительства вынуждены сталкиваться все быстрорастущие города, с другой – проблема крупных жилых микрорайонов в социалистическом стиле имеет ряд особенностей, преимущественно связанных с низким качеством такого жилья и недостатком учреждений социальной инфраструктуры.

6. В западной литературе обычно отрицается наличие пригородов в социалистическом городе, что не соответствует действительности. Пригородная зона социалистического города не имела яркой выраженности и включала сельские поселения и дачные товарищества, которые с ростом города начинали входить в городскую черту, иногда формируя массивы частной индивидуальной деревянной застройки по окраинам, что в полной мере наблюдается в Красноярске.

Типичного для европейских постсоциалистических стран процесса субурбанизации в городе не происходит. В ряде публикаций отмечается, что од-

Охрана труда. Охрана окружающей среды. Геоэкология

ним из мощных толчков для субурбанизации (например, в Будапеште [21]) явилась относительно невысокая стоимость коттеджей в пригородах, что способствовало миграции в пригороды среднего класса, а также относительная дешевизна содержания дома по сравнению со стоимостью коммунальных услуг в городе, что обусловило миграцию бедных слоев населения. В Сибири ситуация обратная – содержание индивидуальных коттеджей весьма дорогостоящее, что сильно замедляет процесс субурбанизации.

7. Транспортная инфраструктура социалистического города ориентировалась на общественный транспорт [21], не предусматривала удобства для передвижения автомобилиста, количество стоянок и парковочных мест было незначительным.

Транспортная проблема является одной из типичных проблем любого современного города, но в постсоциалистических городах приобретает особую остроту, обусловленную административно установленными нормами на число парковочных мест во дворах, пропускную способность улиц и обслуживание общественным транспортом населения.

8. Одной из типичных черт социалистического города считается его компактность [4, 5, 18, 19, 21]. Красноярск ломает стереотипное представление о социалистическом городе как о компактном пространственном образовании. Как отмечалось выше, город некомпактен и разбросан в пространстве.

## Заключение

Красноярск входит в первую десятку российских городов по инвестиционной привлекательности и темпам экономического развития, характеризуется благоприятной демографической ситуацией, обладает значительными ресурсами человеческого потенциала, при этом относится к одному из наиболее загрязненных городов России.

Современный облик Красноярска был сформирован в социалистический период. К социалистическому наследию в пространственной структуре относятся: монофункциональный подход к зонированию городского пространства, крупные промышленные зоны, микрорайонная застройка жилой 30ны, массивы деревянных частных домов в центре и по окраинам города, бараки, наличие крупных массивов лесов и зеленых насаждений, специфика улично-дорожной сети.

К наиболее существенным последствиям социалистического периода Красноярска, влияющим на современное развитие города, следует отнести:

 некомпактность города в сочетании с продолжающимся ростом вширь. «Рыхлость» ткани города влечет за собой наличие заброшенных и неосвоенных территорий в центральных частях, значительную транспортную нагрузку, необходимость дополнительных затрат на строительство и поддержание инженерной инфраструктуры;

– существование микрорайонов преимущественно пятиэтажной застройки 1950...1960 гг. с техническим износом более 50 % и моральным – 100 %, а также бараков. Помимо технических и финансовых трудностей, связанных с реконструкцией и реновацией таких территорий, их дальнейшее существование неизбежно приведет к обострению социальной и криминогенной обстановки;

\_ преимущественная застройка жилой зоны крупными микрорайонами с домами высокой этажности в сочетании с недостаточным развитием объектов социальной инфраструктуры. Нехватка мест в дошкольных и школьных учреждениях, объектах здравоохранения в итоге приводят к проявлению коррупционных явлений в обществе, обострению социальных проблем, миграции населения;

Охрана труда. Охрана окружающей среды. Геоэкология  – существование вплоть до настоящего времени «синдрома временщика», когда комфорту жизни не уделяется должного внимания;

 крупные промышленные зоны, занимающие 30 % территории города, значительные площади которых находятся в заброшенном состоянии. Старые промышленные зоны могут стать как дополнительным ресурсом для развития, так его тормозом и ограничением;

 отсутствие «исторического ядра»
города как такового. В сложившейся ситуации центр города выступает только как коммерчески привлекательный объект, что приводит к реализации амбициозных, популистских и архитектурно эклектичных проектов, продолжающих «размыв» облика города;

 транспортные проблемы города, связанные с недостаточной пропускной способностью улиц, линейной планировкой дорожной сети, небольшим количеством парковок, особенно в центре.

К сугубо «социалистическим» проблемам можно отнести микрорайонную застройку с недостаточным

развитием объектов социальной инфрараспространение микроструктуры, пятиэтажной застройки районов 1950...1960 гг., существование бараков и транспортные проблемы. Особое социалистическое наследие представляет собой синдром «временщика», когда вопросы формирования комфортного городского пространства не являются предметом рассмотрения администрации, архитекторов и планировшиков.

Такие проблемы современного развития, как реновация старых промышленных зон, джентрификация центра города, некомпактность и «рыхлость» градостроительной ткани не являются атрибутом социалистического города и выступают типичными «трудностями роста» современных урбанизированных территорий.

Для решения проблем современного пространственного развития Красноярска город нуждается в четко определенной политике как в отношении градостроительного освоения территории, так и в отношении социальноэкономических программ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Soia, E. The socio-spatial dialectic / E. Soia // Urban Geography. A Global Perspectives. – Oxon : Routledge, 2005. – № 70. – P. 207–225.

2. Скриган, А. Ю. Методика геоэкологического анализа формирования и динамики структуры городского пространства / А. Ю. Скриган, Н. Б. Тупицына // Весн. Брэсц. ўн-та. – 2011. – № 2. – С. 124–131.

3. **Милютин, Н. А.** Соцгород. Проблема строительства социалистических городов. Основные вопросы рациональной планировки и строительства населенных мест СССР / Н. А. Милютин. – М. ; Л. : Гос. изд-во, 1930. – 83 с.

4. The Socialist city: spatial structure and urban policy / Edited by R. A. French and F. E. Ian Hamilton. – New York : Wiley, 1979. - 541 p.

5. Cities under Socialism : and After? / Edited by G. Andrusz, M. Harloe and I. Szelenyi // Cities After Socialism : Urban and Regional Change and Conflict in Post-Socialist Societies. – 1996. – P. 286–318.

6. Ландшафты : оптики городских исследований : сб. науч. тр. / Под ред. Н. Милерюс, Б. Коуп. – Вильнюс : ЕГУ, 2008. – 474 с.

7. **Kubeš**, **J.** European post-socialist cities and their near hinterland in intra-urban geography literature / J. Kubeš // Bulletin of Geography. Socio-economic Series. -2013.  $-N_{2}$  19. -P. 19–43.

8. Официальный сайт администрации города Красноярска [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.admkrsk.ru.

9. Мой Красноярск – народная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http : // region.krasu.ru/rubric/106.

10. Стратегическая оборона. 1941–1942 гг. А в это время в тылу ... Эвакуация [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http : // pobeda.krskstate.ru/oborona/part2\_2. – Дата доступа : 29.10.2013.

Охрана труда. Охрана окружающей среды. Геоэкология 11. Недвижимость Красноярска. Механизм развития города [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http : // www.sibdom.ru/article.php?id=1241 – Дата доступа : 13.11.2013.

12. «Малоэтажка» : почему строим мало домов? – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http : // www.sibdom.ru/article.php?id=1254. – Дата доступа : 13.11.2013.

13. Жилищное хозяйство и бытовое обслуживание населения в России. 2010 : сб. ст. – М. : Росстат, 2010. – 326 с.

14. Вторичный рынок: цены на квартиры в Красноярске [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.bn.ru/krasnoyarsk/articles/2013/07/22/117340.html. – Дата доступа : 13.11.2013.

15. Красноярск. Рынок первичного городского жилья. Обзор аналитического агентства RWAY [Электронный pecypc]. – Режим доступа : http : // rway.ru/upload/41/Krasnoyarsk\_city\_IQ\_2013\_(1).pdf. – Дата доступа : 13.11.13.

16. Анализ рынка коммерческой недвижимости Красноярска. Служба оценки собственности компании «Коммерческая недвижимость Красноярска» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http : // www.knkras.ru/upload/3kv12.pdf. – Дата доступа: 13.11.13.

17. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2012 : сб. ст. – М. : Росстат, 2012. – 990 с.

18. Hirt, S. Whatever happened to the (post)socialist city? / S. Hirt // Cities. – 2013. – № 32. – P. 29–38.

19. Hirt, S. Post-socialist urban forms: notes from Sofia / S. Hirt // Urban Geography. – 2006. – № 27. – P. 464–488.

20. **Tosics, I.** Determinants and Consequences of Spatial Restructuring in Post-Socialist Cities [Электронный pecypc]. – Режим доступа : http : // qcora.web.elte.hu/1/!!!!Orsi/Havanna\_lak%F3telep/ restate / Tosics.pdf. – Дата доступа : 23.10.13.

21. Noody, A. Socio-Economic Segregation and Urban Form in Post-Socialist Budapest [Электронный pecypc]. – Режим доступа : http : // www.fulbright.hu / book4 / anthonynoody.pdf. – Дата доступа : 23.10.13.

22. Pichler-Milanović, N. Urban development in Central and Eastern Europe : from transition to «creative» competition? [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http : / /www.isocarp.net / Data / case\_studies / 585.pdf. – Date of access : 23.10.13.

Статья сдана в редакцию 30 декабря 2013 года

Анна Юрьевна Скриган, канд. геогр. наук, доц. E-mail: skrigan\_anna@tut.by.

**Егор Сергеевич Задереев,** канд. биол. наук, доц., филиал Сибирской академии наук Российской Федерации. E-mail: egzadereev@gmail.com.

**Ирина Владимировна Шилова,** ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет. E-mail: irina.schilova@tut.by.

Anna Yuryevna Skryhan, PhD (Geography), Associate Prof. E-mail: skrigan anna@tut.by.

Egor Sergeyevich Zadereyev, PhD (Biology), Associate Prof., Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. E-mail: egzadereev@gmail.com.

Irina Vladimirovna Shilova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: irina.schilova@tut.by.

# ВЕСТНИК БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

# № 1-2014

Ответственный за выпуск

В. И. Кошелева

Художественное оформление обложки

Дизайн и компьютерная верстка

,

Е.С. Фитцова

Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать трафаретная. Усл.-печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз. Заказ № . Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет» Пр. Мира, 43, 212000, г. Могилев. Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1240 от 08.02.2010, выданное Министерством информации Республики Беларусь. Унитарное полиграфическое коммунальное предприятие «Могилевская областная укрупненная типография имени Спиридона Соболя» ЛП № 02330/0150452 от 03.02.2009. Ул. Первомайская, 70, 212030, г. Могилев.