

ISSN 2218-1806

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ЛНР  
ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**



**РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И  
ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ  
МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ  
№1 (16) 2016**

**Луганск 2016**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ЛНР**  
**ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И  
ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ  
МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**  
**№1 (16) 2016**

**Луганск 2016**

Сборник включен в Перечень научных специализированных изданий ЛНР  
Свидетельство о регистрации: серия МИ-СГР ПИ 000068 от 30.03.2016 г.

Рекомендовано к печати Ученым советом Луганского государственного  
университета имени Владимира Даля (Протокол № 9 от 27.05.2016 г.).

### **Редакционная коллегия:**

Редакционная коллегия: Рябичева Л.А., д-р техн. наук, проф. (председатель редакционной коллегии), (ЛГУ, им. В. Даля); **Алимов В.И.**, д-р техн. наук, проф. (ДонНТУ, г. Донецк); Гедрович А.И., д-р техн. наук, проф. (ЛГУ, им. В. Даля); Гутько Ю.И., д-р техн. наук, проф. (ЛГУ, им. В. Даля); Дорофеев В.Ю. д-р техн. наук, проф. (ЮРГПУ им. М.И. Платова, Россия); Stavrev D., D.Sc., prof. (Technical University of Varna, Varna); J.F. Garcia Orozco, D.Sc., prof. (Sistema de Universidad Virtual - Universidad de Guadalajara, Guadalajara); Popov G., D.Sc., prof. (Technical University of Sofia, Sofia); Baehr R., Dr.-Ing. habil., prof. (Otto-von-Guericke-Universitat, Magdeburg), Яковченко О.В., д-р техн. наук, проф. (ДонНТУ, г. Донецк).

Ответственный за выпуск д-р техн. наук, проф. Рябичева Л.А.

**Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении:** Сб. науч. тр. – Луганск: изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2016. – 234 с.

### **ISSN 2218-1806**

Статьи сборника посвящены результатам теоретических и экспериментальных исследований в области обработки давлением и материаловедения, литья, резания. Рассмотрены вопросы фундаментальных и прикладных исследований, использования новых материалов, методов повышения качества изделий, новых технологий изготовления изделий и усовершенствования технологического оснащения и узлов машин.

Предназначен для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов.

Материалы печатаются на языке оригинала.

Статьи прорецензированы членами редакционной коллегии.

### **ISSN 2218-1806**

© Луганский государственный университет имени Владимира Даля, 2016.

© Lugansk state university of Vladimir Dahl, 2016.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Рябичева Л.А.</b> Напряженно-деформированное состояние при прямом выдавливании порошковых пористых заготовок.....	7
<b>Яковченко А.В., Снитко С.А., Ивлев Н.И., Якушева А.В., Тимофеева Е.А.</b> Разработка эмпирических зависимостей для расчета напряжения течения металла.....	17
<b>Александров В.Д., Зозуля А.П., Фролова С.А.</b> Гистерезисные явления при плавлении и кристаллизации в системе сурьма-висмут.....	30
<b>Алимов В.И., Георгиаду М.В., Шевелев А. И.</b> Объемно-поверхностное упрочнение и размерное восстановление деталей металлургического оборудования.....	37
<b>Алимов В.И.</b> Проявления последствий холодной пластической деформации на коррозионном взаимодействии с газовыми и жидкими средами стальной проволоки.....	44
<b>Ершов В.М., Коробко Т.Б., Ершов М.В.</b> Тонкая структура холоднодеформированной высокоуглеродистой стали.....	56
<b>Пономарева Н.В.</b> Обоснование целесообразности совершенствования технологии изготовления литейных форм для улучшения состояния поверхности отливок колесных центров.....	63
<b>Дубасов В.М., Могильная Е.П., Пономарева Н.В.</b> Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства наружных пружин подвижного состава.....	69
<b>Макухин А.Г., Сыровой Г.В., Синдеева Е.В.</b> Механизм взаимодействия наночастиц с полимерной матрицей...	75
<b>Сыровой Г.В., Ивин Н.В., Синдеева Е.В.</b> Определение несущей способности металлического лейнера композитного баллона.....	80



<b>Бурко В.В., Стоянов А.А.</b> Экспериментальные исследования спироидного зацепления с применением критериев наугрузочной способности.....	87
<b>Никитин Ю.Н.</b> Переработка медьсодержащих отходов в порошки механической флотацией.....	94
<b>Тарасенко О.В., Ивженко А.А., Креселюк Ю.В.</b> К расчету магнитного потока массивной ферромагнитной детали при ее локальном намагничивании.....	100
<b>Гедрович А.И., Каленская А.В., Гальцов И.А.</b> Автоматическая сварка плакированной стали с комплексным воздействием на металл сварочной ванны.....	107
<b>Бояршина Л.А.</b> Влияние структурных превращений на качество дуговой наплавки при восстановлении.....	115
<b>Коваленко А.А., Чубарова И.А.</b> Нестационарная гидродинамическая сила, действующая на золотник эгу.....	122
<b>Засько В.В.</b> Применение монолитных покрытий промышленных полов.....	131
<b>Рябичева Л.А., Сороканич С.В.</b> Аналитическая модель процессов сульфатной коррозии при влагопереносе.....	140
<b>Дьяковская О.С.</b> Внедрение новых технологий в производство многопустотных плит перекрытия.....	147
<b>Шинкарева Т.А.</b> Методологические аспекты природопользования и ресурсосбережения в литейном производстве.....	151

<b>Зубов А.Р., Чепурной А., Дементьев Д.И.</b> К вопросу гидрологической безопасности предприятий Луганска.....	156
<b>Зубова Л.Г., Олейникова М.А.</b> Ювелирно-поделочные и поделочные минералы морских терригенных осадков.....	163
<b>Зубова Л.Г., Павлюковская Е.И.</b> Особенности рельефа морского дна, сформировавшегося в юрский период.....	171
<b>Зубов А.Р., Зубова Л.Г., Арутюнян К.Г.</b> Исследование проблемы пополнения мировых ресурсов пресной воды.....	181
<b>Луцкий Д.В.</b> Исследование удельного электросопротивления монокристаллов сплавов Sb-Bi выращенных методом Чохральского.....	188
<b>Аветисов Р.А.</b> Плоское напряженное состояние кругов АКВР при неравномерном натяжении.....	194
<b>Комаров Н.В., Руденко А.А., Черников Н.Г.</b> Нанометрический спектрометр для исследования поверхностных свойств твердых тел.....	202
<b>Третьяк А.Е., Тугай А.В.</b> Моделирование износа шлифовальника на станке шлифовки пластин.....	209
<b>Коструб В.А., Вербская Л.М.</b> Анализ термокинетических параметров плетельно- пултрузионного процесса формирования композитных стержней силового набора.....	215

<b>Коструб В.А., Меликбемян А.Х., Вербская Л.М.</b> Особенности выбора параметров изготовления силовых композитных стержней.....	222
<b>Коструб В.А., Вербская Л.М.</b> Исследование процесса формования композитных стержней методом ролтрузии.....	228
<b>Требования к оформлению статей.....</b>	232

Рябичева Л.А.

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК

Ryabicheva L.A.

### THE STRESS-STRAIN STATE DURING DIRECT EXTRUSION OF POROUS POWDER BILLETS

Представлены результаты моделирования прямого выдавливания порошковых пористых заготовок на основе закономерностей теории пластичности. Получено распределение напряжений и деформаций, плотности при выдавливании детали с закрытой полостью. Определена оптимальная величина противодействия, которая обеспечивает равномерность напряженно-деформированного состояния при заданной плотности детали. Рекомендованы аналитические зависимости для определения величины противодействия от относительной глубины полости и давления от противодействия. Разработана технология изготовления детали с закрытой полостью.

**Ключевые слова:** выдавливание, порошковая пористая заготовка, теория пластичности, противодействие, напряжение, деформация.

#### Введение

В технологиях изготовления деталей тел вращения с отверстиями и глухими полостями из порошковых материалов методами обработки давлением широко используются различные виды выдавливания. Полые детали с дном обычно получают обратным выдавливанием, которое характеризуется высокими давлениями и сложными условиями работы пуансона [1]. Однако изготовление полых деталей прямым выдавливанием обеспечивает уменьшение давления на пуансон за счет уменьшения реактивных сил трения [2]. При выдавливании полых деталей из пористых заготовок, когда деформированию предшествует стадия уплотнения, целесообразным является применение прямого выдавливания. При этом существуют ограничения на минимальную толщину стенки и на максимальную глубину выдавливаемой полости.

**Целью работы** является компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС), распределения плотности порошковой пористой заготовки, выбор наиболее рациональной величины проти-

водавления при прямом выдавливании и разработка технологии изготовления полых детали.

### Постановка задачи

Математическое моделирование прямого выдавливания выполнено на основе закономерностей теории пластичности пористых тел. Пластический потенциал рассматривается, как функция компонентов тензора напряжений и представляется в виде [3]:

$$F = \frac{\tau^2}{\varphi} + (1+m)^2 \frac{\left( p + \frac{m}{m+1} \Theta \sigma_s \sqrt{\psi} \right)^2}{\psi} - \Theta \sigma_s, \quad (1)$$

где  $p = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$  – среднее давление;

$\tau = \sqrt{(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})}$  – интенсивность касательных напряжений;

$\varphi = (1 - \theta)^2$ ,  $\psi = \frac{2(1-\theta)^2}{3\theta}$  – функции пористости  $\theta$ ;

$\Theta = 1 - \theta$  – относительная плотность.

$m$  – параметр, характеризующий степень несовершенства контактов в порошковой заготовке и определяющий разное сопротивление пористой заготовки при ее испытании на растяжение и сжатие.

Скорость изменения объема в результате пластической деформации:

$$e \sim \frac{2(1+m)^2}{\psi} p + \frac{2m(1+m)\sigma_0}{\sqrt{\psi}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – напряжение течения твердой фазы, которое может быть представлено в виде зависимости  $\sigma = \sigma_0 + K\omega^{0.5}$ , где  $K$  – коэффициент упрочнения.

Скорость накопления деформации в твердой фазе пористого тела определялась на основе постулата В.В. Скорохода [4] об однозначности диссипативной функции:

$$\omega = \sqrt{1-\theta} \left( \frac{m}{1+m} \sqrt{\psi} e + \frac{\sqrt{(1+m)^2 \gamma^2 + e^2 \psi}}{1+m} \right), \quad (3)$$

где  $\gamma$  – скорость изменения формы.

Величина накопленной деформации  $\omega$  определяется путем решения дифференциального уравнения:

$$\frac{d\omega}{dt} = W, \quad (4)$$

где  $W$  – эквивалентная скорость деформации:

$$W = \frac{1}{\sqrt{1-\Theta}} \sqrt{\psi e^2 + \varphi \gamma^2}. \quad (5)$$

Для определения распределения интенсивности напряжений и деформаций, а также относительной плотности использовано требование экстремальности функционала [5]:

$$J(v_i(x)) = \int_{\Omega} D(e_{ij}(V_i)) d\Omega + \int_{\partial\Omega_p} p_i v_i d(\partial\Omega), \quad (6)$$

где  $D(e_{ij}(V_i))$  – диссипативная функция;

$p_i$  – вектор напряжений на поверхности исследуемой заготовки;

$v_i$  – вектор скорости на поверхности исследуемой заготовки.

Первый интеграл в формуле (6) представляет собой полную скорость диссипации энергии, второй интеграл – мощность внешних напряжений.

Для пористой заготовки диссипативная функция  $D(e_{ij}(V_i))$  имеет вид:

$$D(e_{ij}(V_i)) = \frac{\sqrt{\gamma^2 \varphi + e^2 \psi}}{\sqrt{1-\theta}} \tau_s + \frac{p_0 e}{\sqrt{1-\theta}}, \quad (7)$$

где  $V_i = v(x)$ ,  $e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $p_0 = -\sqrt{\frac{2}{3}} \tau_s \sqrt{\psi} \frac{m}{1+m}$ ,

$\tau_s$  – предел текучести твердой фазы на сдвиг.

Для оценки неравномерности НДС в объеме заготовки использованы выражения:

$$\sigma_{inh} = \frac{\sum_{j=1}^N \sqrt{(\sigma_i^{ave} - \sigma_i^j)^2}}{\sigma_i^{ave} N}, \quad e_{inh} = \frac{\sum_{j=1}^N \sqrt{(e_i^{ave} - e_i^j)^2}}{e_i^{ave} N}, \quad (8)$$

где  $\sigma_i^{ave}$  – среднее арифметическое интенсивностей напряжений в объеме заготовки;

$e_i^{ave}$  – среднее арифметическое интенсивностей деформаций в объеме заготовки;

$\sigma_i^j$  – интенсивность напряжений в  $j$ -м конечном элементе;

$e_i^j$  – интенсивность деформаций в  $j$ -м конечном элементе.

В расчетах на основании экспериментальных данных приняты зависимости противодавления  $p_{np}$  от давления выдавливания  $p$  и от соотношения размеров детали  $h/b$  (где  $h$  - глубина полости в детали,  $b$  - толщина стенки) в виде экспоненциальных функций:

$$p_{i\delta}(p) = A \exp(K_1 p), \quad p_{i\delta}\left(\frac{h}{b}\right) = A \exp\left(K_2 \frac{h}{b}\right), \quad (9)$$

где  $K_1 = (0,01 - 0,1)\eta$  – коэффициент жесткости напряженного состояния;

$\eta = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3}}{\sigma_i}$  – показатель жесткости напряженного состояния;

$K_2 = \frac{\varepsilon_i^{\max}}{\varepsilon_i^{\min}}$  – коэффициент неравномерности деформации.

### Результаты исследования

Решение задачи рассмотрено на примере прямого выдавливания полых деталей из медной порошковой заготовки методом конечных элементов, расчетная схема представлена на рис. 1. Исходная плотность заготовки  $\rho = 7,6 \text{ г/см}^3$ , пористость 15%, диаметр  $D = 28 \text{ мм}$ , высота  $H = 26 \text{ мм}$ ,

диаметр полости детали  $d = 14$  мм, ее высота  $h = 14,8$  мм, толщина стенки  $b = 7$  мм, коэффициент трения  $\mu = 0,25$ . Напряженно-деформированное состояние анализировали в осевом сечении донной части, угловом сечении и по ширине стенки детали.

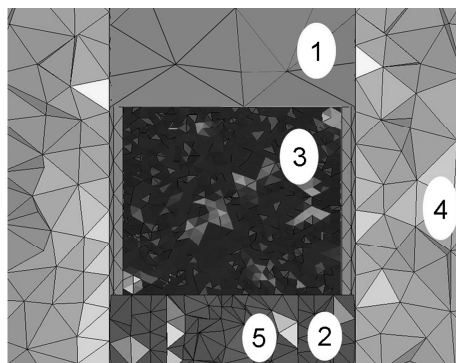


Рис. 1. Конечно-элементная модель прямого выдавливания: 1 – пуансон верхний; 2 – противодавление; 3 – порошковая пористая заготовка; 4 – матрица с бандажом; 5 – контрпуансон

На первом этапе деформирования происходит осадка, радиальное течение металла и заполнение матрицы. При этом плотность быстро растет. На втором этапе осуществляется процесс выдавливания полости. Моделирование НДС выполнено при противодавлении 95 МПа, 120 МПа и 140 МПа. Наибольшая неравномерность напряженного состояния при величине противодавления 95 МПа наблюдается в угловом сечении и по ширине стенки и достигает 0,11-0,18. Происходит интенсивное течение металла по границам полости, возрастает концентрация напряжений, что способствует формированию брака в виде утяжины у нижнего торца заготовки. На рис. 2 показано распределение интенсивности напряжений и деформаций в трех сечениях заготовки при противодавлении 120 МПа. Наибольшая величина интенсивности напряжений и деформаций достигнута в донной части, что соответствует экспериментальным исследованиям (рис. 3). В угловом сечении и по ширине стенки напряжения уменьшаются к центральной оси заготовки. Увеличение противодавления до 120 МПа обеспечило понижение неравномерности деформаций и получение качественного изделия. Коэффициент неравномерности деформации уменьшается с 0,59 при 95 МПа до 0,43 при 120 МПа.



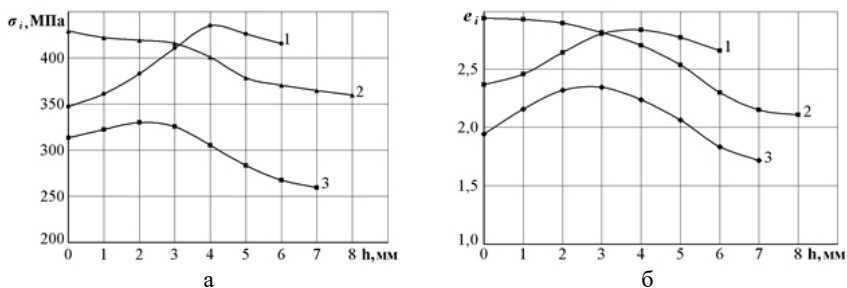


Рис. 2. Интенсивность напряжений – а, интенсивность деформации – б при противодавлении 120 МПа:  
1 - осевое сечение донной части, 2 - угловое сечение, 3 - сечение по ширине стенки заготовки

Результаты экспериментальных исследований деформированного состояния подтверждают данные математического моделирования (рис. 3). Эксперименты показали, что при противодавлении 120 МПа интенсивность деформации в очаге под пуансоном несколько снизилась, а на торцах и в кольцевой части заготовки увеличилась. При противодавлении 140 МПа получена качественная заготовка высокой плотности. Однако увеличение противодавления приводит к росту давления выдавливания. При выдавливании с противодавлением 95 МПа и глубине полости 14,7 мм, давление составило 820 МПа, а с противодавлением 120 МПа его величина равнялась 950 МПа.

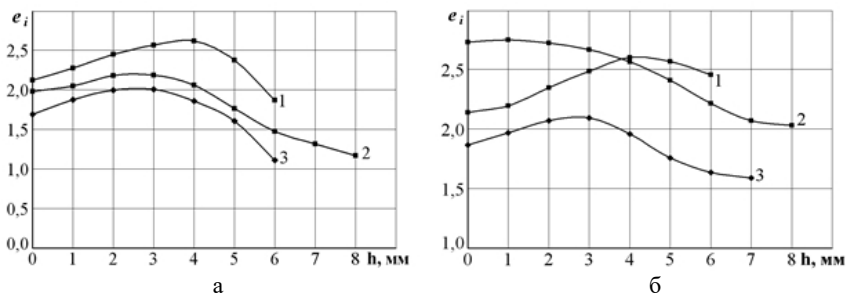


Рис. 3. Интенсивность деформации при противодавлении 95 МПа – а, при противодавлении 120 МПа – б:  
1 - осевое сечение донной части, 2 - угловое сечение, 3 - сечение по ширине стенки заготовки

Увеличение равномерности деформации с ростом противодействия обеспечивает устранение дефекта в виде утяжины и повышение равномерности заготовки.

На рис. 4 показано изменение относительной плотности при различном противодействии, приведена общая относительная плотность заготовки, а также плотность ее донной и кольцевой частей.

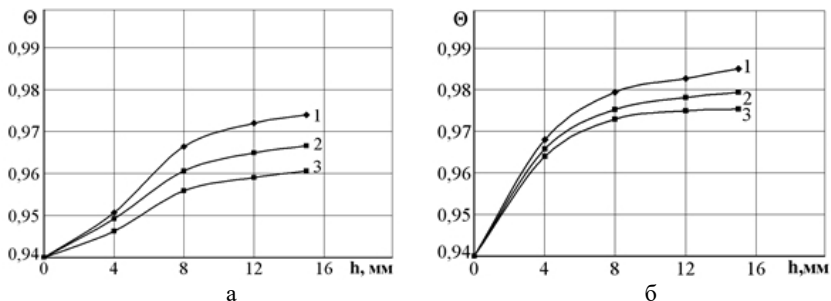


Рис. 4. Изменение относительной плотности в зависимости от глубины полости заготовки при различном противодействии: а – 95 МПа; б – 120 МПа: 1 – общая относительная плотность заготовки; 2 – донной части; 3 – кольцевой части

Результаты расчета зависимостей противодействия от относительной глубины полости, а также от давления выдавливания (рис. 5) рекомендуются для использования при выборе противодействия.

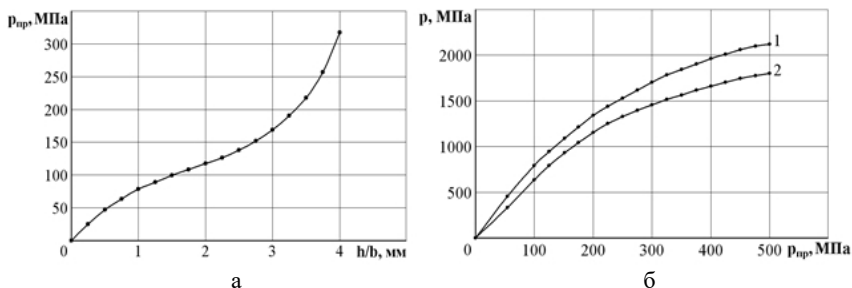


Рис. 5. Зависимость противодействия от относительной глубины полости в детали – а, от давления выдавливания – б: 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

Дальнейшее увеличение противодействия до 140 МПа способствует уменьшению разноплотности, однако интенсивность напряжений на пуан-

сонах приближается к условному пределу текучести штамповой стали после термической обработки, что приводит к быстрому их износу.

Результаты исследований использованы при разработке технологии изготовления детали «заглушка» (рис. 6, а) [5]. По условиям работы деталь "заглушка" должна иметь высокую пластичность, а ее пористость не должна превышать 2%.

Технологический процесс изготовления детали состоит из следующих операций: подготовка шихты; прессование заготовки диаметром 25 мм и высотой 29 мм, пористостью 20%; спекание 1 ч при температуре 920°C; штамповка выдавливанием на гидравлическом прессе силой 1600 кН.

Штамповка осуществляется следующим образом (рис. 6, б). В начальный момент матрица 2 и пуансон 6 удерживаются в крайнем в верхнем положении пружинами 4 и 9. Плита 1 с верхним пуансоном закреплена на траверсе пресса и находится в верхнем положении. Заготовку цилиндрической формы 5 диаметром меньше диаметра матрицы на величину, обеспечивающую степень радиальной деформации величиной 25-55%, загружают в полость матрицы 2. Положение матрицы регулируют так, что заготовка помещается на 2-3 мм ниже ее верхнего торца. При ходе ползуна пресса вниз плита 1 давит на матрицу 2, принудительно перемещает ее и сжимает пружины 4. При этом пуансон 6 не перемещается, упираясь в скобу 11. Перемещение матрицы 2 приводит к радиальному деформированию заготовки и уплотнению. Свободное радиальное течение металла за счет разности диаметров матрицы и заготовки в процессе осадки обеспечивает получение более высокой плотности, равномерности и снижает давление штамповки на этом этапе.

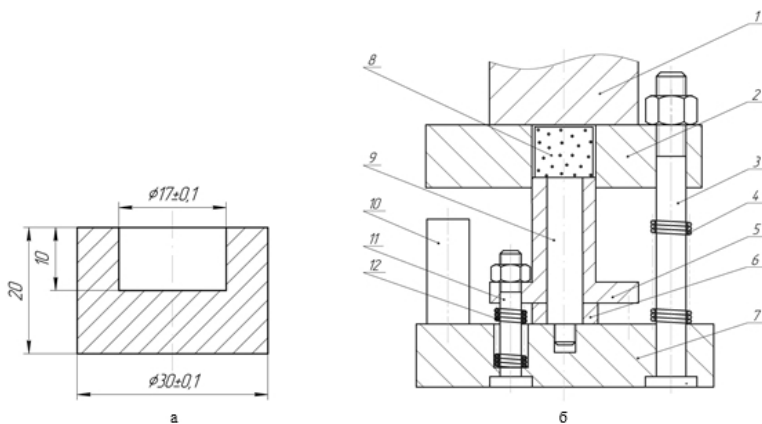


Рис. 6. Чертеж детали «заглушка» – а и схема штампа – б

Уплотнение происходит до относительной плотности 0,9. На втором этапе удаляют скобу 11 и продолжают процесс штамповки. Заготовка под действием плиты 1 давит на пуансон 6, который сжимает пружину 9, и перемещается одновременно с матрицей 2, происходит процесс выдавливания стенки детали. Высокая плотность, достигнутая на первом этапе, наличие противодействия, перемещение матрицы в направлении движения формующего пуансона способствует процессу дальнейшего уплотнения пористой заготовки и формообразованию детали. Процесс продолжается до тех пор, пока матрица 2 не доходит до регулируемого ограничителя 7, пуансон 6 до плиты 12. Выталкивание детали из штампа осуществляется стягиванием матрицы, со стержня деталь снимается за счет силы пружин 9. Деформирование заготовки происходит в условиях всестороннего неравномерного сжатия, что обеспечивает изготовление детали без дефектов с плотностью, близкой к теоретической (рис. 7).



Рис. 7. Фото детали «заглушка», полученной из пористой медной заготовки

Получены детали с общей относительной плотностью 0,98, соответствующие техническим требованиям чертежа.

### **Выводы**

Выполнена оценка неравномерности напряженно-деформированного состояния при прямом выдавливании детали с глубокой полостью из порошковой пористой заготовки. При малой величине противодействия в детали наблюдается неравномерность НДС и выраженная разноплотность материала, в результате чего образуются дефекты в виде утяжины. При величине противодействия 120 МПа из заготовки пористостью 15% получена высококачественная деталь с необходимой плотностью. Рекомендованы

зависимости величины противодействия от относительной глубины полости, а также давления выдавливания от противодействия. Разработана технология изготовления детали «заглушка» из медного порошка.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Головин В.А. Технология холодной штамповки выдавливанием / В.А. Головин, А.М. Митькин, А.Г. Резников. – М.: Машиностроение, 1970. – 152 с.
2. Роман О.В. Исследование процесса холодной штамповки выдавливанием спеченных пористых заготовок / О.В. Роман, Е.А. Дорошкевич, Е.В. Звонарев [и др.] // Порошковая металлургия. – 1980. – №11. – С. 28-34.
3. Штерн М.Б. Феноменологические теории прессования порошков / М.Б. Штерн [и др.] – К.: Наукова думка, 1982. – 140 с.
4. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания / В.В. Скороход. – К.: Наукова думка, 1972. – 152 с.
5. Рябичева Л.А. Технологии изготовления порошковых деталей методами пластического деформирования / Л.А. Рябичева, А.Т. Цыркин – Луганск, Изд-во ВНУ им. В.Даля, 2009. – 176 с.

**Ryabicheva L.A. The stress-strain state during direct extrusion of porous powder billets.**

*The modeling results for direct extrusion of porous powder billets on the basis of plasticity theory are presented. Distributions of stress-strain state parameters and density during direct extrusion of hollow detail from copper porous powder billet were obtained. The optimal value of backpressure have found for ensuring the uniform stress-strain state and given density of detail. The analytical dependences of backpressure from relative depth of cavity and extrusion pressure from backpressure were recommended. The production technology for manufacturing of hollow detail has been developed.*

**Keywords:** extrusion, porous powder billet, plasticity theory, backpressure, stress, deformation.

Рябичева Л.А. – д-р техн. наук, профессор Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: ryabic@gmail.com

УДК 621.73.06-52

**Яковченко А.В., Снитко С.А., Ивлева Н.И., Якушева А.В.,  
Тимофеева Е.А.**

## **РАЗРАБОТКА ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА**

**Yakovchenko A.V., Snitko S.A., Ivleva N.I., Yakusheva A.V.,  
Timofeyeva E.A.**

### **DEVELOPMENT OF EMPIRICAL RELATIONS FOR CALCULATING THE STRESS METAL FLOW**

Усовершенствован метод определения констант эмпирических формул для расчета напряжения течения металла. С учетом реализации методов планируемого эксперимента, наименьших квадратов и сплайн-интерполяции экспериментальной информации разработана компьютерная программа для расчета констант формул. Получены новые эмпирические зависимости для 44 конструкционных, инструментальных и нержавеющей марок сталей. Определена средняя относительная ошибка аппроксимации экспериментальной информации, которая составила 3,5%.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование напряжения течения металла, сплайн-интерполяция экспериментальной информации, метод планируемого эксперимента, анализ точности аппроксимации.

#### **Введение**

Моделирование напряжения течения металла в процессах обработки давлением является важной научно-технической проблемой. В настоящее время имеются обширные экспериментальные данные о зависимости напряжения течения металла  $\sigma$  от степени деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $u$  и температуры  $T$ , представленные в виде соответствующих графиков. Определение на их основе значений  $\sigma$  в ручном режиме является трудоемким процессом и не всегда достаточно точным, поэтому вопросы компьютерного моделирования имеют большое значение.

Формула, предложенная проф. Зюзиным В.И. для расчета напряжения течения металла  $\sigma$  [1], позволяет получить хорошие результаты и до настоящего времени находит широкое применение

$$\sigma = \frac{A \cdot \varepsilon^{n_1} \cdot U^{n_2}}{e^{n_3 T}}, \quad (1)$$

где  $A$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  – константы, зависящие от материала;  
 $\varepsilon$  – степень деформации;  
 $U$  – скорость деформации;  
 $T$  – температура.

В работах [2, 3, 4] на основе реализации планируемого эксперимента и компьютерной сплайн-интерполяции экспериментальной информации разработан новый метод определения констант эмпирических формул. На его основе в работе [4] получен ряд формул для расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , используя экспериментальные зависимости напряжения течения металла от степени деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $U$  и температуры  $T$  [5, 6]. Вместе с тем формулы (1) на основе экспериментальных зависимостей напряжения течения металла от термомеханических коэффициентов получены только для восьми марок сталей [1].

**Цель работы:** определение констант, входящих в формулу расчета напряжения течения металла  $\sigma$ , предложенную Зюзиным В.И., для ряда конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей на основе экспериментальных зависимостей напряжения течения металла от термомеханических коэффициентов.

### **Постановка задачи**

Усовершенствование метода определения констант эмпирических формул для аппроксимации экспериментальных зависимостей напряжения течения металла от термомеханических коэффициентов и разработка соответствующей компьютерной программы. Получение на ее основе новых эмпирических зависимостей.

### **Результаты исследования**

Разработанная компьютерная программа, окна которой показаны на рис. 1 – 5, предназначена для создания каталога марок сталей, формирования базы данных по кривым упрочнения, расчета напряжения течения металла и расчета констант эмпирических формул (1).

Для добавления марки стали в Каталог необходимо выполнить следующее. Вне программы создается папка для хранения информации по новой марке стали. Ее имя должно содержать: наименование марки стали, [источник] (например, [1], номер страницы, номер рисунка).

В данную папку необходимо поместить файлы с рисунками, отредактированными в соответствии со следующими требованиями.

Используя сканированное изображение рисунка с кривыми упрочне-

ния требуется с помощью любого графического редактора получить растровый рисунок по размерам, не превышающем прямоугольную область, имеющую 600x800 точек по горизонтали и вертикали соответственно. Подготовленный указанным образом рисунок необходимо сохранить в файл с именем «Исходный рисунок.jpg».

При увеличении графиков требуется, чтобы каждый из них не превышал прямоугольную область, имеющую 750x350 точек. Полученные изображения графиков сохраняют в файлы с именами: 1.bmp (график  $k_T$ ), 2.bmp (график  $k_\varepsilon$ ), 3.bmp (график  $k_u$ ).

Далее необходимо переместить созданную папку вместе с сохраненными в ней рисунками кривых упрочнения в папку программы Каталог и все дальнейшие действия выполнять непосредственно в программе: Файл -Каталог – <Имя созданной папки> - Исходный рисунок.jpg

Рассмотрим последовательность определения  $\sigma_{\text{эксп}}$ , при заданных значениях факторов  $\varepsilon^*$ ,  $u^*$ ,  $T^*$ . В окне, (см. рис. 1), в таблицах, расположенных в правой части задается имеющееся на графиках количество значений  $\varepsilon$ ,  $u$ ,  $T$ , их величина и маркировка. Задается также химический состав стали, если он указан. Информация сохраняется нажатием кнопки «Сохранить».

На следующем этапе в окне (см. рис. 2) для всех узловых точек координатных осей ставятся в соответствие значения  $k_T$  и  $T$  в единицах, указанных на координатных осях, а также в единицах растрового изображения, которые определяются программно. Сначала вводится количество узловых точек на оси абсцисс. При этом с помощью переключателя поочередно выбирается каждое узловое значение  $T$ , затем наводится курсор мыши на вертикальную линию, проходящую через соответствующую узловую точку на оси абсцисс рисунка, и выполняется щелчок левой кнопкой мыши. В результирующую таблицу автоматически заносится значение абсциссы узловой точки в единицах растрового изображения, а на самом рисунке вычерчивается вертикальная линия. Аналогичные действия выполняются и для оси ординат.

Графическая визуализация построенных линий необходима для обеспечения максимально точного совпадения построенной сетки и исходной. Она выполняется другим цветом, по отношению к цвету линии исходной координатной сетки. При необходимости указанные значения уточняют.



Рис. II.56. Сопротивление деформации сталей 60С2 (0,56 % С; 1,80 % Si; 0,78 % Mn, 0,02 % S; 0,01 % P; 0,13 % Cr; 0,30 % Ni)

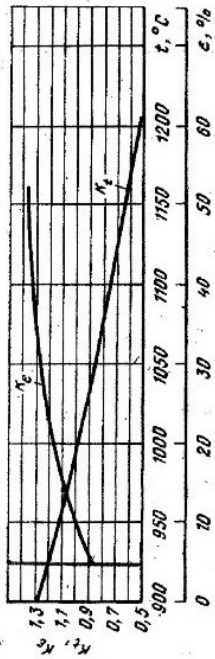


Рис. II.56. Температурный  $k_t$  и степенной  $k_e$  коэффициенты стали 60С2

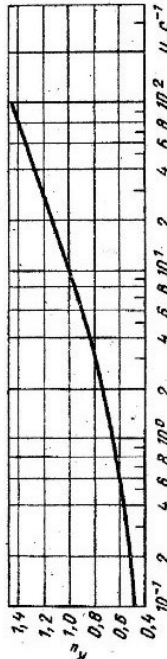


Рис. II.57. Скоростной  $k_v$  коэффициент стали 60С2;  $\sigma_0, \Delta = 11,4$  кгс/мм²

86

Наименование марки 60С2

Степень деформации (ε, %)

Количество значений

1	5
2	10
3	20
4	30
5	40
6	50

Химический состав (%)

(для методов проф. Андреева Л.В., проф. Николаева В.А.)

C	0,56
Mn	0,78
Si	1,80
Cr	0,13
Ni	0,30
W	
Mo	
V	
Ti	
Al	
Co	
Nb	
Cu	

Скорость деформации (ш.1/с)

Количество значений

1	0,1
2	0,2
3	0,3
4	0,4
5	0,5
6	0,6

Температура (Т, град.С)

Количество значений

1	900
2	950
3	1000
4	1050
5	1100
6	1150

$\sigma_0$ , кгс/мм²

Сохранить

Далее>>

<<Назад

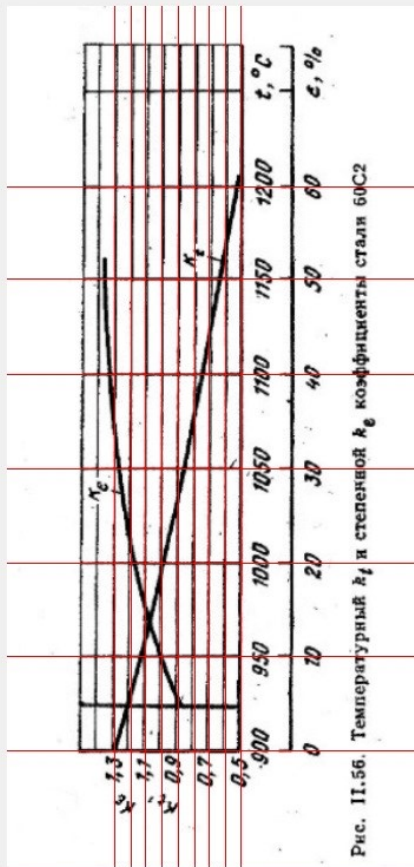
Рис. 1. Окно исходной информации для рассматриваемой марки стали

### Температурный коэффициент $k_T$

Выбор координатной оси  
 горизонтальная  
 вертикальная

Количество узловых точек  
на горизонтальной оси  
графика  $k_T$

Количество узловых точек  
на вертикальной оси  
графика  $k_T$



Определение координат  
узловых точек на вертикальной  
оси графика  $k_T$  в единицах  
растворного изображения

1	0.5	198
2	0.6	185
3	0.7	171
4	0.8	159
5	0.9	145
6	1.0	131
7	1.1	117
8	1.2	105
9	1.3	91

Текущее значение  
Номер  $k_T$

Цвет линий координатной сетки

Определение координат узловых точек на горизонтальной оси  $T$  в единицах растворного изображения

1	2	3	4	5	6	7
900	1000	1050	1100	1150	1200	
98	178	257	337	417	498	576

Текущее значение  
Номер  $T$

Рис. 2. Окно построения координатной сетки

На основе полученной информации для любой точки, лежащей на графике  $k_i=f(t)$ , можно определить абсциссу и ординату в растровых единицах, а затем рассчитать их в единицах, указанных на координатных осях. В правой части окна (рис. 3) имеется переключатель для выбора текущих значений  $T$ . На точку графика, соответствующую текущему значению  $T$  необходимо навести курсор и щелкнуть левой кнопкой "мыши". Программа вычисляет значение  $k_i$ , а нажатие кнопки "Поместить в таблицу" заносит его в таблицу.

Далее выполняется сплайн-интерполяция полученной информации и построение сплайн - кривой в окне (см. рис. 3). Если ход исходной кривой достаточно сложный, и сплайн-кривая неточно ложится на исходную кривую, то можно увеличить число вертикальных координатных линий, соответствующих заданным значениям  $T$ .

Аналогичные действия выполняются и для графиков кривых  $k_u=f(u)$ ,  $k_\varepsilon=f(\varepsilon)$ . Окна программы представлены на рис. 1, 2, 3.

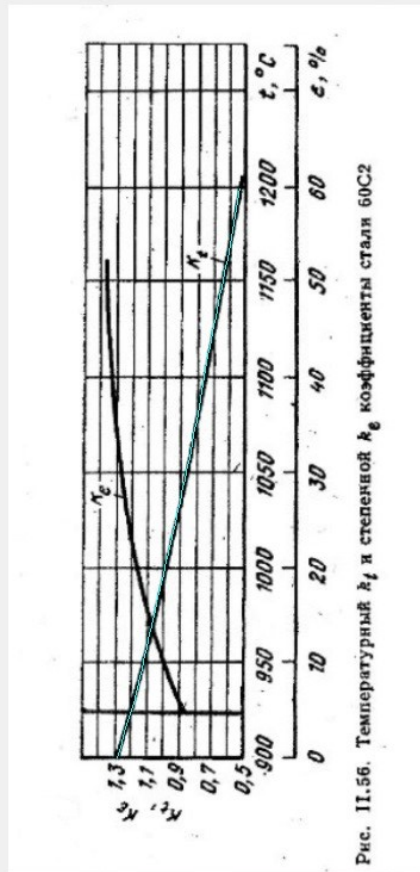
На основе полученной информации выполняется расчет величин  $\sigma$ , при всех требуемых значениях факторов. Результаты автоматически передаются в соответствующую таблицу окна (см. рис. 4).

Таблица, представленная на рис. 4, используется для определения значений напряжения течения металла при заданных значениях факторов  $\varepsilon^*$ ,  $u^*$ ,  $T^*$ . В правой части окна рис. 4, в соответствующие поля вводятся значения степени деформации  $\varepsilon^*$ , скорости деформации  $u^*$ , и температуры  $T^*$ , при которых требуется определить экспериментальное значение напряжения течения металла  $\sigma_{\text{эксп}}$ .

Определение координат точек кривой графика  $K_T$

Текущая позиция курсора  $T = 900$

$K_T = 1.300$



Выбор значения фактора

$T$  900

Значение  $K_T$  при заданном факторе

$T$  900

$K_T$  1.300

Поместить в таблицу

Отменить

1	2	3	4	5	6	7
900	1.133	1.000	0.871	0.756	0.636	0.531
1.300						

Добавить

Рис. 3. Окно определения координат  $k_1$  и контрольного построения сплайн-кривых

Использование компьютерной программы, реализующей поэтапную сплайн-интерполяцию табличной информации, позволяет наиболее точно получить значения  $\sigma_{\text{эксп}}$ , на базе экспериментальных кривых упрочнения в зависимости от требуемых значений факторов  $\epsilon$ ,  $u$ ,  $T$ .

Для научно обоснованного выбора расположения точек в области изменения факторов  $\epsilon$ ,  $u$ ,  $T$  при определении значений  $\sigma$  применили метод планируемого расчетного эксперимента [7].

Эксперимент спланирован по плану второго порядка, применено центральное композиционное ортогональное планирование в зависимости от трех факторов  $\epsilon$ ,  $u$  и  $T$ .

На основе имеющейся экспериментальной информации необходимо определить пределы изменения факторов  $\epsilon$ ,  $u$ ,  $T$  и выполнить их кодирование. План-матрица разрабатывается для кодовых значений факторов. Затем выполняется расчет соответствующих значений факторов в натуральных переменных. В качестве нулевого уровня фактора выбирается, середина интервала, для которого, во-первых, имеется экспериментальная информация, и, во-вторых, необходимо разработать формулу.

При планировании эксперимента по плану второго порядка план-матрица для 3-х факторов  $\epsilon$ ,  $u$ ,  $T$  содержит 15 опытов. Планируемый эксперимент, охватывает заданную область изменения факторов  $\epsilon$ ,  $u$ ,  $T$  и определяет наиболее рациональные точки для определения величин  $\sigma$  на основе экспериментальной информации. Причем это обоснованный теорией планируемого эксперимента минимум опытов.

Окно компьютерной программы для формирования в автоматическом режиме матрицы планируемого эксперимента и расчета констант эмпирической формулы (1) представлено на рис. 5.

На основе усовершенствованного метода и разработанной компьютерной программы определены константы эмпирической формулы (1) для 44 конструкционных, инструментальных и нержавеющей марок сталей (см. табл. 1). Определена средняя относительная ошибка  $\Delta$  аппроксимации экспериментальной информации, которая составила 3,5%.

Каталог марок сталей и сплавов

Таблица экспериментальных значений напряжения течения металла в зависимости от факторов  $\{\epsilon, u, T\}$

Степень деформации	5	10	20	30	40	50
T = 900, U = 0.1	6.224	7.081	8.282	8.971	9.364	9.554
T = 900, U = 0.2	6.710	7.634	8.929	9.671	10.095	10.299
T = 900, U = 0.3	7.104	8.082	9.453	10.239	10.687	10.904
T = 900, U = 0.4	7.392	8.410	9.837	10.655	11.122	11.347

Рис. 4. Окно формирования таблицы экспериментальных значений  $\sigma$

## Аппроксимация экспериментальной информации на основе формулы проф. Зюзина В.И.

### Пределы изменения факторов

e min	e max	U min (1/c)	U max (1/c)	T min. (град.С)	T max. (град.С)
0.050	0.500	0.1	100	900	1200

Имя файла: КАТАЛОГ\Стали по источнику 36002[3], стр.86, рис. II, 56-57

### Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1	0	+1
Натуральные значения факторов	0.050	0.2750	0.4601
e (1/c)	0.1	50.050	91.148
T (град.С)	900	1050.000	1173.416

### План-матрица эксперимента

X1	X2	X3	e	U (1/c)	T (град.С)	S <sub>эксп</sub> (МПа)
1	-1	-1	0.0699	8.952	926.584	130.287
2	+1	-1	0.4601	8.952	926.584	178.372
3	-1	+1	0.0699	91.148	926.584	191.686
4	+1	+1	0.4601	91.148	926.584	262.438
5	-1	-1	0.0699	8.952	1173.416	63.116
6	+1	-1	0.4601	8.952	1173.416	86.418
7	-1	+1	0.0699	91.148	1173.416	92.866
8	+1	+1	0.4601	91.148	1173.416	127.146
9	-1.2154	0	0.050	50.050	1050.000	113.732
10	+1.2154	0	0.500	50.050	1050.000	174.578
11	0	-1.2154	0.2750	0.1	1050.000	57.983
12	0	+1.2154	0.2750	100	1050.000	173.825
13	0	0	-1.2154	0.2750	50.050	240.857
14	0	0	+1.2154	0.2750	50.050	96.381
15	0	0	0.2750	50.050	1050.000	161.377

### Результаты расчета

S <sub>p</sub> (МПа)	D (%)
134.352	3.128
184.513	3.443
195.360	1.917
268.278	2.225
64.880	2.794
89.096	3.099
94.334	1.881
129.544	1.866
109.967	3.310
171.999	1.477
96.193	3.087
171.227	4.781
238.354	1.039
98.390	0.009
153.140	5.104

$$\sigma = \frac{A \cdot e^{n1} \cdot U^{n2}}{e^{n3} \cdot T}$$

A	2316.567486190993010
n1	0.194261894606510
n2	0.161297021399574
n3	0.002949392061952

Der (%) 2.592

Мак. число итераций  Выполнено - 6



<<Назад

Далее>>

Рис. 5. Окно расчета констант эмпирической формулы (1)

Таблица 1

**Расчет констант, входящих в формулу (1), (выполнено на основе экспериментальной информации [1])**

Марка стали	$A$ , МПа	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$\Delta$ , %
1	2	3	4	5	6
4Х13; стр.97, рис. П. 89-90	5094,3	0,24514	0,09599	0,0034748	3,6
ЭП311; стр.110, рис. П. 128-129	4614,4	0,08895	0,07749	0,0029863	3,4
ЭП220; стр.112, рис. П. 134-135	376130,8	0,07626	0,08633	0,0064541	3,2
ЭП99; стр.111, рис. П. 131-132	225944,8	0,16632	0,08191	0,0057297	1,5
ЭИ661; стр.109, рис. П. 125-126	15928,9	0,34676	0,09467	0,0032631	1,3
ШХ15; стр.78, рис. П. 32-33	2319,5	0,23968	0,16914	0,0030264	1,3
ХН78Т; стр.105, рис. П. 113-114	9010,4	0,34937	0,09919	0,0032686	1,9
ХН75МБТЮ; стр.106, рис. П. 116-117	9268,8	0,35531	0,010738	-0,0032452	7,4
ХН70Ю; стр.108, рис. П. 122-123	18499,7	0,38216	0,09615	0,0036309	1,6
ХВГ; стр.92, рис. П. 74-75	2909,1	0,24113	0,10379	0,0028723	3,1
Х20Н80; стр.104, рис. П. 110-111	7739,5	0,12592	0,12592	0,0033229	2,7
Х18Н12М2Т; стр.102, рис. П. 104-105	3467,3	0,22338	0,17301	0,0031032	3,9
Х18Н9Т; стр.100, рис. П. 98-99	2831,8	0,26059	0,08635	0,0027485	4,02
Х17Н2; стр.99, рис. П. 95-96	6190,8	0,23742	0,08429	0,0036808	3,5
Х16Н5М4; стр.98, рис. П. 92-93	2563,8	0,10186	0,11709	0,0031268	2,6
У8; стр.75, рис. П. 23-24	1837,7	0,24065	0,18234	0,0029019	0,9
Сталь типа хромоникель-молибденной; стр.90, рис. П. 68-69	3194,6	0,22219	0,10614	0,0030724	2,8
Сталь типа хромомолибденной; стр.88, рис. П. 62-63	2132,4	0,23376	0,10908	0,0026286	3,3
Сталь типа молибденомарганцевистой; стр.87, рис. П. 59-60	3071,6	0,24834	0,10509	0,00299956	4,6

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
Сталь типа кремнемарганцовистой,; стр.89, рис. II. 65-66	1896,5	0,18294	0,12264	0,0026038	3,9
Ст6; стр.74, рис. II. 20-21	2863,6	0,23651	0,13674	0,0032092	2,5
Ст3; стр.72, рис. II. 14-15	2082,8	0,23087	0,14874	0,0029661	2,07
P18; стр.103, рис. II. 107-108	2335,2	0,22956	0,16879	0,0026052	3,5
ВЖ98; стр.107, рис. II. 119-120	6890,9	0,36276	0,10697	0,0027281	1,4
60С2; стр.86, рис. II. 56-57	2316,6	0,19426	0,16129	0,0029494	2,6
45ХН; стр.83, рис. II. 47-48	2886,7	0,27909	0,20772	0,0033010	13,4
45; стр.73, рис. II. 17-18	1512,3	0,20920	0,14415	0,0026895	1,6
30ХГСА; стр.85, рис. II. 53-54	2351,9	0,26679	0,13667	0,0028794	1,1
20ХНГР; стр.84, рис. II. 50-51	1612,4	0,32852	0,20316	0,0025193	10,7
20ХГНМ; стр.94, рис. II. 80-81	1866,6	0,23646	0,08025	0,0024722	2,8
20Х5НГ2; стр.96, рис. II. 86-87	4238,4	0,20089	0,10422	0,0032828	2,4
20; стр.71, рис. II. 10-11	1636,5	0,23783	0,14921	0,0027333	2,2
18ХНВА; стр.91, рис. II. 71-72	2353,3	0,21693	0,08061	0,0027877	3,9
18ХГТ; стр.82, рис. II. 44-45	1316,5	0,28202	0,24658	0,0026377	5,7
15Х5М; стр.95, рис. II. 83-84	3431,3	0,25589	0,10773	0,0030304	1,8
14ГН; стр.80, рис. II. 38-39	2443,3	0,21589	0,15542	0,0030293	1,5
12ХНМФА; стр.92, рис. II. 77-78	1721,2	0,26477	0,06363	0,0022699	3,5
12ХНЗА; стр.81, рис. II. 41-42	2250,5	0,24984	0,12433	0,0029088	1,9
12Х17; стр.101, рис. II. 101-102	4951,8	0,33089	0,09771	0,0031364	3,1
10ХН; стр.77, рис. II. 29-30	2115,6	0,29011	0,08121	0,0026116	2,9
08КП; стр.69, рис. II. 5-6	916,2	0,22402	0,15576	0,0021632	3,8
08Ю; стр.70, рис. II. 8-9	3839,8	0,3822	0,1281	0,0032415	5,1
15 ХСНД; стр.79, рис. II. 35-36	240798,2	0,2132	0,1519	0,0030699	2,3
40Х; стр.76, рис. II. 26-27	2726,3	0,2516	0,1324	0,0030812	4,7

### Выводы

На основе методов планируемого эксперимента, наименьших квадратов и сплайн-интерполяции экспериментальной информации разработана компьютерная программа для расчета констант формул (1) на базе экспериментальных графических зависимостей напряжения течения металла от



термомеханических коэффициентов. Получены новые эмпирические зависимости для 44 конструкционных, инструментальных и нержавеющей марок сталей. Средняя относительная ошибка аппроксимации экспериментальной информации составила 3,5%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков А.И. Теория прокатки: Справочник / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин [и др.]. - М.: Металлургия, 1982. - 335с.
2. Яковченко А.В. Определение напряжения течения металла с учетом истории процесса нагружения на основе уравнения А.Надаи / А.В.Яковченко, Н.И.Ивлева, А.А.Пугач // Наукові праці ДонНТУ. Металургія, 2011. -Вип.12(177). - С.181 - 193.
3. Яковченко А.В. Анализ точности известных методов расчета напряжения течения металла в зависимости от химического состава стали / А.В. Яковченко, А.А. Пугач, Н.И. Ивлева // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2011. - Вип.2(23). - С. 69 - 80.
4. Яковченко А.В. Формулы расчета напряжения течения металла для конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей / А.В. Яковченко, А.А. Пугач, Н.И. Ивлева // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып. №2(31). – С. 166 – 173.
5. Полухин П.И. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. - 352с.
6. Поздеев А.А. Примение теории ползучести при обработке металлов давлением. / А.А. Поздеев, В.И. Тарновский, В.И. Еремеев [и др.]. // Изд-во «Металлургия», 1973, 192с.
7. Винарский, М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях: учеб. пособие / М.С. Винарский, М.В Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.

***Yakovchenko A.V., Snitko S.A., Ivlev N.I., Yakusheva A.V., Timofeyeva E.A. Development of empirical relations for calculating the stress metal flow.***

*The method of determining the constants of empirical formulas for calculating metal flow stress was improved. Taking into account the the implementation of the planned experimental method, of least squares method and spline interpolation of experimental data the computer program to calculate the formulas constants was developed. The new empirical relations to 44 structural, tool and stainless steels were obtained. The average relative error of approximation of experimental data was determined, which was 3.5%.*

***Keywords:*** *computer simulation of metal flow stress, spline interpolation of experimental data, the method of the planned experiment, the analysis accuracy of approximation.*

Яковченко А.В. – д-р техн. наук, профессор Донецкого национального технического университета, г. Донецк  
e-mail: mond1991@mail.ru

Ивлева Н.И. – инженер Донецкого национального технического университета, г. Донецк  
e-mail: ivl22@mail.ru

Снитко С.А. – канд. техн. наук, доцент Донецкого национального технического университета, г. Донецк  
e-mail: snitko\_sa@mail.ru

Якушева А.В. – магистр Донецкого национального технического университета, г. Донецк  
e-mail: nastia.jani@gmail.com

Тимофеева Е.А. – магистр Донецкого национального технического университета, г. Донецк  
e-mail: azazel.timofeeva@yandex.ru

Александров В.Д., Зозуля А.П., Фролова С.А.

## ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПЛАВЛЕНИИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ СУРЬМА-ВИСМУТ

Aleksandrov V.D., Zozulia A.P., Frolova S.A.

### HYSTERESIS EFFECTS AT THE MELTING AND CRYSTALLIZATION IN THE SYSTEM OF SB-BI

На основании термограмм нагревания и охлаждения с учётом фазовых превращений типа плавление-кристаллизация проанализированы термические гистерезисные (ТГ) явления для образцов в системе сурьма-висмут. Установлено, что петля ТГ образуется при сравнении равновесных процессов плавления и кристаллизации с неравновесным процессом кристаллизации. Разработаны схемы изменения энтальпии при плавлении и трёх этапов затвердевания (зародышеобразования, коагуляции зародышей и докристаллизации), как для сурьмы и висмута, так и для сплавов. Установлено, что выявленный ТГ (для однокомпонентных веществ и для сплавов) относится к этапу образования зародышей и их коагуляции. Показаны пути изменений энтальпий и энергий Гиббса при формировании термического гистерезиса.

**Ключевые слова:** термический гистерезис, сурьма, висмут, сплавы, термический анализ, плавление, кристаллизация, петля гистерезиса, энтальпия, энергия Гиббса.

#### Введение

Изучение термических гистерезисных (ТГ) явлений при плавлении и кристаллизации металлов и сплавов имеет большое значение для сравнительного анализа механизмов прямого и обратного фазовых превращений, их взаимосвязи друг с другом, выяснения причин отсутствия перегревов твёрдой фазы и наличия значительных переохлаждений жидкой фазы, поиска путей повышения эффективности использования теплоты превращения, особенно при циклических переходах расплав ↔ твёрдое тело.

Исследования в этом направлении, в основном, касаются однокомпонентных веществ [1-4]. Однако не менее важными являются ТГ для сплавов.

**Целью работы** является анализ бинарной системы сурьма-висмут, образующих непрерывный ряд твёрдых растворов

## Результаты исследования

Рассмотрим в качестве примера бинарную систему сурьма-висмут, образующих непрерывный ряд твёрдых растворов [5] от температуры плавления висмута  $T_L^{Bi} = 544,6\text{ К}$  до температуры плавления сурьмы  $T_L^{Sb} = 903,9\text{ К}$ . Вначале проследим за образованием термического гистерезиса у простого вещества, например висмута, на основании результатов термического анализа [6]. Термограммы плавления и кристаллизации в координатах температура  $T$  – время  $\tau$  обычно записываются в одном направлении (рис. 1). Если сравнить кривые нагревания  $abcd$  с кривой охлаждения  $dcbg$ , то при их сопоставлении никакого гистерезиса быть не может, поскольку плавление и кристаллизация происходят изотермически при равенстве температур плавления  $T_L$  и кристаллизации  $T_S$ .

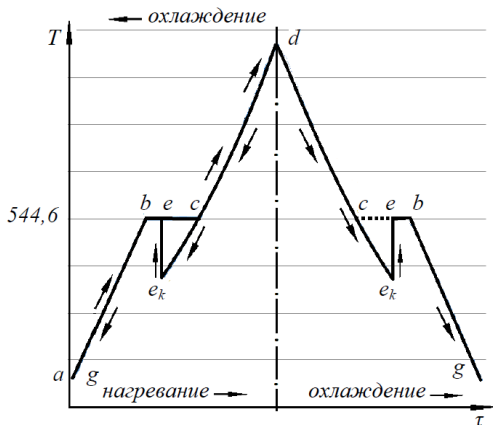


Рис. 1. Термограмма характеризующая плавление и кристаллизацию висмута. Стрелками показаны направления процессов нагревания и охлаждения

Если кристаллизация будет неравновесной, тогда кривая охлаждения  $de_kebg$  при её развороте на  $180^\circ$  и совмещении с кривой нагревания  $abcd$  даст т.н. петлю гистерезиса  $se_kec$ .

Аналогичный гистерезисный эффект может возникнуть при изучении процессов плавления и неравновесной кристаллизации сплавов. На рис. 2 для сравнения приведены схематические кривые нагревания и охлаждения (с неравновесной кристаллизацией) образцов в системе Sb-Bi:  $abcd$  и  $de_kebg$  для Sb,  $ab'c'd$  и  $de'_ke'b'g$  для сплава Sb + 50 масс.% Bi,  $ab''c''d$  и  $de''_ke''b''g$  для Bi, с образованием петель  $se_kec$  (для Sb),  $c'e'_ke'c'$  (для сплава) и  $c''e''_ke''c''$  (для Bi). Отличие ТГ для сплава от ТГ для Sb и Bi

заключается в том, что его плавление начинается при температуре солидуса  $T_S$  (в точке  $b'$ ) и заканчивается при температуре ликвидуса  $T_L$  (в точке  $c'$ ). При этом плавится сплав равновесно. Кристаллизация же происходит неравновесно с переохлаждением  $\Delta T_2^-$  относительно температуры ликвидуса  $T_L$ , начиная от точки  $c'$  (ликвидус) и заканчивая в точке  $b'$  (солидус). Общим для всех образцов является то, что неравновесная кристаллизация идёт в три этапа: зародышеобразования ( $c \rightarrow e_k, c' \rightarrow e'_k, c'' \rightarrow e''_k$ ), коагуляции зародышей ( $e_k \rightarrow e, e'_k \rightarrow e', e''_k \rightarrow e''$ ) и докристаллизации ( $e \rightarrow b, e' \rightarrow b', e'' \rightarrow b''$ ).

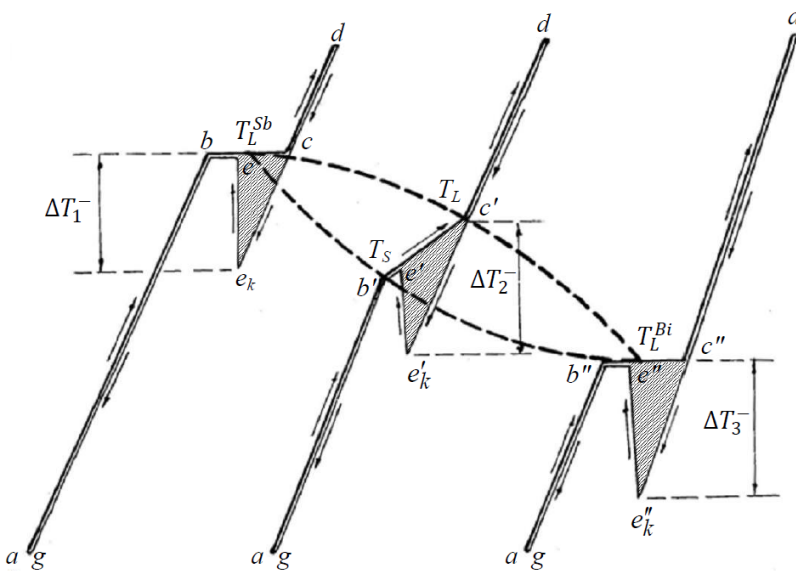


Рис. 2. Схематические термограммы нагрева и охлаждения Sb, сплава Sb +50 % Bi и Bi на фоне диаграммы Sb-Bi (пунктир). Стрелками показаны направления записей

На основании термограмм, показанных на рис. 2, начерчены схемы изменений энтальпий плавления  $\Delta H_L$ , равновесной кристаллизации  $\Delta H_S$  и трёх этапов затвердевания: зародышеобразования  $\Delta H_1$ , коагуляции  $\Delta H_2$  и докристаллизации  $\Delta H_3$  для чистых компонентов (рис. 3) и сплава (рис. 4).

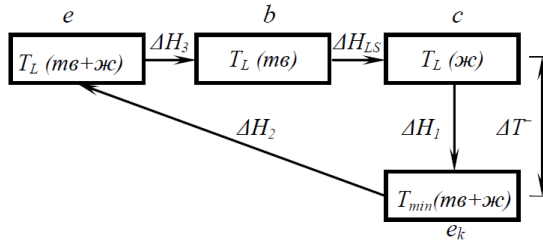


Рис. 3. Схема изменения энтальпий для чистых компонентов

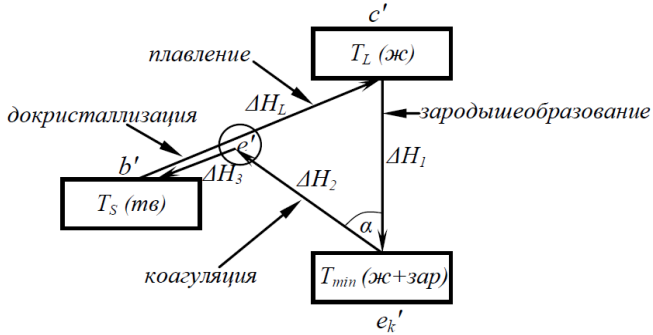


Рис. 4. Схема изменений энтальпий для сплава

Проанализируем поведение энергии Гиббса в зависимости от температуры  $T$  и концентрации компонентов при кристаллизации бинарного сплава, образующего непрерывный ряд твердых растворов с учётом наличия и отсутствия переохлаждений относительно линий ликвидуса и солидуса (рис. 5). На этом рисунке показаны зависимости энергий Гиббса для  $Sb$  ( $G_L, G_S$ ),  $Bi$  ( $G_L'', G_S''$ ) и промежуточного сплава ( $G_L', G_S'$ ) от температуры в соответствии с термограммами, показанными на рис. 2. Видно, что при наложении друг на друга кривых  $G(T)$  при нагревании (с учётом плавления) и охлаждения (с учётом неравновесной кристаллизации) образуются петли гистерезиса (см. заштрихованные участки).

Особо надо остановиться на анализе энергии Гиббса для сплава. Изобарно-изотермический потенциал Гиббса для бинарных сплавов  $A+B$  зависит не только от удельной теплоёмкости  $c_p$  и внутренней энергии  $U$ , но и от концентрации  $x$  второй компоненты и имеет вид [7, 8]:

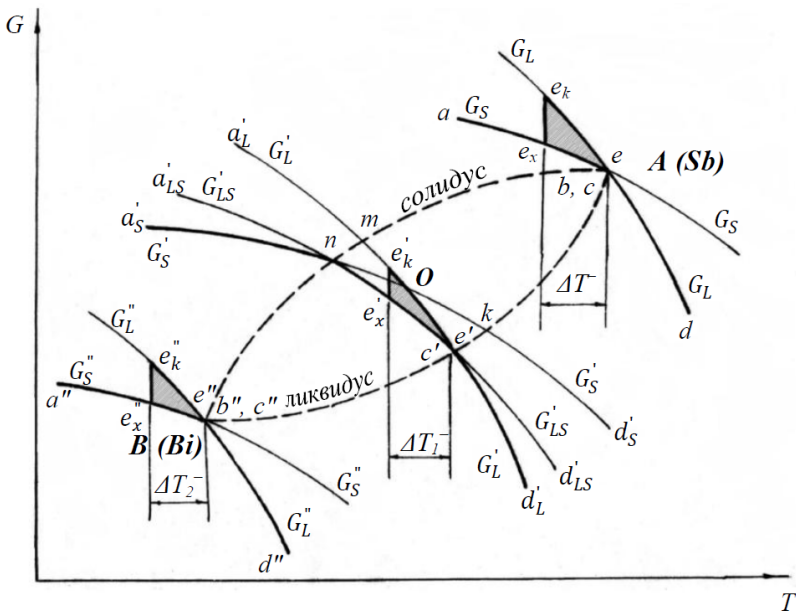


Рис. 5. Зависимость энергий Гиббса для жидкой ( $G_L$ ), жидко-твёрдой ( $G_{LS}$ ) и твёрдой фаз ( $G_S$ ) от температуры с учётом плавления и кристаллизации

$$G = U_0 + \int_0^T c_p dT - T \int_0^T \frac{c_p}{T} dT + RT[x \ln x + (1-x) \ln(1-x)] \quad (1)$$

Ввиду отсутствия в литературе надёжных данных по зависимости  $G = f(x, T)$  для бинарных твёрдых растворов жидкой ( $G_L$ ), жидко-твёрдой ( $G_{LS}$ ) и твёрдой ( $G_S$ ) областей, можно лишь качественно оценить эти величины методами геометрической термодинамики. Учитывая, что энтропия системы возрастает при переходе твёрдая фаза  $\rightarrow$  твёрдо-жидкое состояние  $\rightarrow$  жидкая фаза, кривые  $G'_L(T)$ ,  $G'_{LS}(T)$ ,  $G'_S(T)$  для сплавов фиксированного состава  $xA + (1-x)B$  на основании уравнения (1) будут иметь вид, показанный на рис. 5 на примере диаграммы состояния для непрерывного ряда твёрдых растворов. Кривая  $G'_L(T)$  проходит через точки  $d'_L m a'_L$ , кривая  $G'_S(T)$  – через точки  $d'_S k n a'_S$ , кривая  $G'_{LS}(T)$  – через точки  $d'_{LS} c' n a'_{LS}$ . В отсутствие «жидко-твёрдой» области в интервале температур от  $T_L$  до  $T_S$  (от точки  $c'$  до точки  $n$ ) кривые  $G'_L(T)$  и  $G'_S(T)$  пересекаются в точке  $O$  и фазовый переход для сплава должен

происходить в одной точке  $O$  при одной температуре  $T_o$ , что противоречит правилу фаз Гиббса. Для сплава с фиксированным составом число степеней свободы  $i$  в двухфазной области между точками ликвидуса и солидуса при постоянном давлении равно  $i = 2 - 2 + 1 = 1$ , т.е. переход от жидкого раствора к твёрдому раствору возможен в интервале температур от  $T_L$  до  $T_S$ . В этой связи кривая  $G'_{LS}$  в двухфазной зоне располагается ниже линий  $c'm$  и  $kn$ . Таким образом, энергия Гиббса  $G'_{LS}(T)$  при охлаждении с учётом фазового превращения должна проходить через точки  $d'_{LS}c'na'_{LS}$ . Эта линия удовлетворяет всем термодинамическим условиям. На участке  $d'_Lc'$  (выше  $T_L$ ) устойчив жидкий раствор, на участке  $c'n$  (между  $T_L$  и  $T_S$ ) – устойчива зона жидко-твёрдого состояния, на участке  $na'_S$  (ниже  $T_S$ ) – устойчив твёрдый раствор. В любой  $i$ -той точке на кривой  $c'n$  при фиксированных температурах  $T_i$  ( $T_L > T_i > T_S$ ) соблюдаются условия термодинамического равновесия жидко-твёрдого состояния  $G'_L = G'_S$ .

Схема, представленная на рис. 5, объясняет и наличие движущих сил кристаллизации переохлажденного на  $\Delta T_i^-$  расплава относительно линии ликвидуса  $\Delta G_L = f(\Delta T_L^-)$ . В данном случае при неравновесной кристаллизации раствора функция  $G'(T)$  проходит по пути  $d'_Lc'e'_ke'_xe'_na'_S$ . В случае же равновесной кристаллизации кривая  $G'(T)$  будет проходить по пути  $d'_Lc'na'_S$  относительно  $T_L$ . Видно, что разница в кривых (как нагревания, так и охлаждения) приводит к образованию петли гистерезиса (см. затемнённые участки на рис. 5) аналогично тому, что имеет место на термограммах (рис. 2).

## Выводы

Термический гистерезис, как для однокомпонентных веществ, так и для сплавов может формироваться в двух случаях. Либо при сопоставлении кривых нагревания (с учётом равновесного процесса плавления) и кривых охлаждения (с учётом неравновесной кристаллизации), либо при сопоставлении кривых охлаждения с равновесной и неравновесной кристаллизациями гистерезис обусловлен отсутствием перегревов твёрдой фазы и наличием переохлаждений у жидкой фазы при кристаллизации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов Д.Н. Гистерезис температур плавления и кристаллизации наночастиц металлов / Д.Н. Соколов, Н.Ю. Сдобников, П.В. Комаров [и др.]. // Структура и свойства металлов и шлаковых расплавов: в 4 т: Труды XIII рос. конф. (Екатеринбург, 12-16 сент. 2011, РАН, секция физ.-хим. основ металлург. процессов), 2001. – С. 26-29.



2. Климов В.А. Формирование петли температурного гистерезиса при фазовом переходе металл-полупроводник в плёнках диоксида ванадия / В.А. Климов, И.О. Тимофеева, С.Д. Ханин [и др.] // ЖТФ, 2002. – Т. 72, № 9. – С. 67-74.
3. Замулин И.С. Исследование методом молекулярной динамики некоторых физических свойств нанокристаллов Pt и Pd при процессах плавления и кристаллизации / И.С. Замулин., С.Л. Гафнер. // Материалы. Междунар. научно-техн. конф. – Москва: Intermatic, 2012, ч. 1. – С. 15-18.
4. Борыняк Л.А. Температурный гистерезис плавления и кристаллизации нанобъектов / Л.А. Борыняк., А.П. Чернышов // Научный вестник Новосибирского гос. техн. ун-та, 2014, № 1 (54), - С. 172-179.
5. Александров В.Д. Построение диаграмм состояния Bi-Sb, Sn-Bi с предкристаллизационными переохлаждениями / В.Д. Александров, А.А. Баранников, С.А. Фролова // Металлы. – 2002. - №5. – С. 105-111.
6. Александров В.Д. Зависимость предкристаллизационного переохлаждения расплава висмута от массы образцов / В.Д. Александров, В.А. Постников // Письма в ЖТФ, 2003. Т. 29, вып. 7 – С. 48-54
7. Коттрелл А.Х. Строение металлов и сплавов / А.Х. Коттрелл // М.: Гос. НТИ лры по чер. и цв. металлургии. –1961. – 288 с.
8. Соколовская Е.М. Металлохимия / Е.М. Соколовская, Л.С. Гузей – М.: МГУ. – 1986. –264 с.

**Aleksandrov V.D., Zozulia A.P., Frolova S.A. Hysteresis effects at the melting and crystallization in the system of Sb-Bi.**

*On the basis of thermal images of heating and cooling in view of phase transformations such as melting, crystallization were analyzed thermal hysteresis (TH) effects for the samples in the system antimony-bismuth. It is established that a loop the TH formed by compared to the equilibrium melting and crystallization processes, with a nonequilibrium crystallization process. Developed schemes for enthalpy change of melting and three stages of solidification (nucleating, coagulation of embryos and until crystallization) as antimony and bismuth, and an alloy. It is established that the identified TH (for one-component substances and alloys) refers to the stage of formation of nuclei and theirs coagulation. The ways of the change in enthalpy and Gibbs energy in the formation of thermal hysteresis.*

**Keywords:** *thermal hysteresis, antimony, bismuth, alloys, thermal analysis, melting, crystallization, hysteresis loop, enthalpy, Gibbs energy.*

Александров В.Д. – д-р. хим. наук, профессор Макеевской инженерно-строительной академии, г. Макеевка  
e-mail: axd-crystal@mail.ru

Зозуля А.П. – инженер Макеевской инженерно-строительной академии, г. Макеевка  
e-mail: zozulyanastya@yandex.ua

Фролова С.А. – канд. хим. наук, доцент Макеевской инженерно-строительной академии, г. Макеевка  
e-mail: primew65@mail.ru

Алимов В.И., Георгиаду М.В., Шевелев А.И.

## ОБЪЕМНО-ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ И РАЗМЕРНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Alimov V.I., Georgiadoy M.V., Shevelev A.I.

### VOLUME-SURFACE HARDENING AND DIMENSIONAL RESTORATION OF DETAILS OF METALLURGICAL EQUIPMENT

Изучена микроструктура, свойства и износостойкость деталей металлургического оборудования, изготовленных из легированных конструкционных сталей. Проведено объемно-поверхностное упрочнение с использованием токов высокой частоты, получены твердая и износостойкая поверхность и вязкая сердцевина, что позволяет применить менее дефицитную сталь. Результаты работы могут быть использованы области упрочнения тяжело нагруженных металлургических деталей и восстановления изношенных рабочих размеров.

**Ключевые слова:** упрочнение, закалка, токи высокой частоты, улучшение, отжиг, твердость, микроструктура, восстановление размеров

#### Введение

Наиболее часто причиной выхода из строя деталей металлургического оборудования является абразивный износ, происходящий из-за смятия и среза микрообъемов металла, превращающегося в стружку и работающего в качестве абразивных частиц между поверхностями трения [1, 2]. Другая причина потери работоспособности тяжело нагруженных деталей – питтинг или выкрашивание, т.е. отделение от поверхности трения металла с минимальными линейными размерами по причине повышения контактных напряжений. Закономерности износостойкости при этом определяют величину порога текучести металла и пластической деформацией при сложно нагруженном состоянии, возникающем в сжатых поверхностных слоях стальных деталей при трении качением. Кроме того, сжатие в поверхностных упрочненных наклепом слоях деталей при нагреве под термическую обработку приводит к их размерным изменениям, т.е. изношенные до определенной границы тяжело нагруженные изделия изменяют свои размеры до допустимых [3, 4].

Износостойкость деталей металлургического оборудования зависит не только от химического состава стали, но и от структурного состояния, а в сложнелегированных сталях, еще и от состава и количества и размеров

карбидной фазы. Применение нестандартной, например, объемно-поверхностной термической обработки позволяет использовать для изготовления тяжело нагруженных деталей стали с меньшим количеством легирующих элементов, что делает их более выгодными для производителя [5]. Для конструкционных сталей наиболее износостойкой считается микроструктура сорбита отпуска, сочетающая в себе свойства наиболее благоприятные с точки зрения твердости, предела прочности, сопротивления срезу и разрушению, работы распространения трещины. Объемно-поверхностное упрочнение деталей металлургического оборудования позволяет повысить износостойкость и сохранить сопротивление динамическим нагрузкам [6].

**Целью работы**<sup>\*)</sup> являлось изучение микроструктуры, свойств и износостойкости деталей металлургического оборудования, изготовленных из легированных конструкционных сталей с использованием объемно-поверхностного упрочнения.

#### **Методика исследования**

Для исследований использовали пробы, отобранные от поковки валшестрени (промвал) редуктора Ц 2-400, работающего в механизме перемещения крана грузоподъемностью 15 т доменной печи. Фактический срок работы изделия составляет 3 - 12 месяцев; выход из строя, в основном, происходит по причине износа зубьев шестерни.

Промвалы ранее изготавливали из стали 40ХН, однако в настоящее время переходят на безникелевые стали типа 45Х; для сохранения комплекса эксплуатационных свойств необходима корректировка технологии. После нагрева до температуры 1000 °С пробы ковали на 2-х тонном прессе. Пробы разделяли на 3 группы и производили: I) полный отжиг (800 – 820 °С, печь); II) нормализацию (800 – 820 °С, воздух); III) неполный отжиг (740 – 760 °С, печь) в заводской печи СШО. Пробы после полного и неполного отжига далее подвергали улучшению; температура отпуска составила 600 – 620 °С; далее проводили закалку токами высокой частоты (ТВЧ) от температур нагрева 920 – 940 °С. Нормализованные пробы также подвергали закалке с нагревом ТВЧ. После высокочастотной закалки все пробы подвергали низкому отпуску в печи СНО.

Микроструктуру исходных и упрочненных изучали на микроскопе Neophot-21. Твердость измеряли во взаимно перпендикулярных направлениях поперечных образцов на твердомере Роквелла.

---

\*) В работе принимал участие инженер И. Морозов.

Для исследования абразивной износостойкости использовали установку и методику по [7 - 10].

### **Результаты исследования**

Из рис.1 следует, что колебания твердости на поверхности не превышают 3 HRC. Такое распределение связано с равномерностью прогрева при индукционной закалке. В среднем твердость проб после полного предварительного отжига была наибольшей (58 HRC).

Характерной особенностью распределения твердости по сечению (рис. 1 б,г,е) является отклонение твердости на пробах, предварительно улучшенных перед закалкой ТВЧ. Это может быть связано с тем, что данный слой нагрелся от 650 °С до  $A_{c1}$ , поэтому появляется структурно свободный феррит (рис. 2), который и снижает твердость.

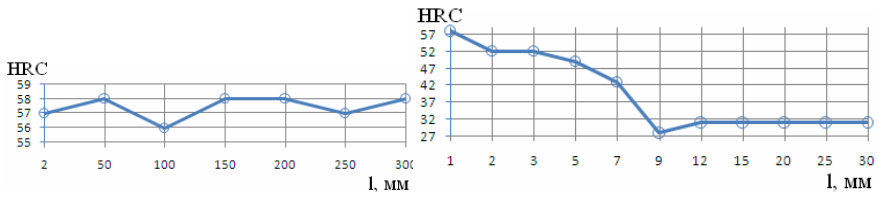
Кроме того, поверхностный слой (рис. 3) упрочняется по-разному: после предварительного полного отжига (рис. 3а) высокая твердость (45 HRC) сохраняется до глубины 7 – 8 мм от поверхности; после исходной нормализации (рис. 3б) упрочненный слой составляет около 3 – 4 мм с твердостью 43 – 45 HRC; после исходного неполного отжига (рис. 3в) твердость 43 – 45 HRC сохраняется на глубине слоя 4 – 5 мм.

Сердцевина проб после исходной нормализации (рис. 4б), состоит из равномерно распределенных феррита и перлита; после улучшения микроструктура представлена тросто-сорбитом (рис. 4 а,в).

На рисунке 5 показаны результаты исследований проб на абразивный износ после различных режимов комбинированного объемно-поверхностного упрочнения, из которого видно, что наибольшей износостойкостью обладают пробы, обработанные по режиму: полный отжиг, улучшение, закалка ТВЧ и завершающий отпуск.

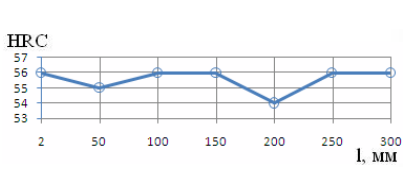
### **Выводы**

1. Проведение объемно-поверхностного упрочнения деталей металлургического оборудования, с использованием нагрева под термическую обработку токов высокой частоты, позволяет получить твердую и износостойкую рабочую поверхность в сочетании с вязкой, выдерживающей динамические нагрузки, сердцевиной.

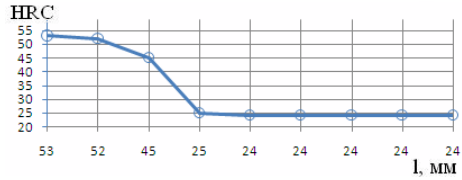


а

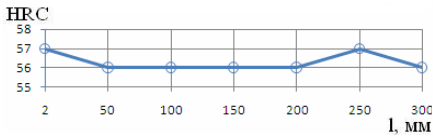
б



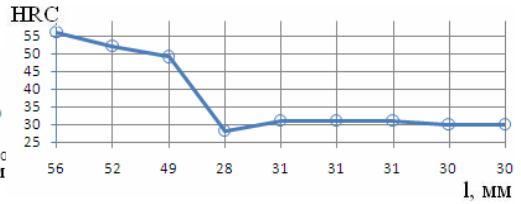
в



г

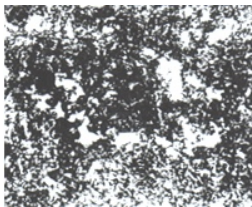


д

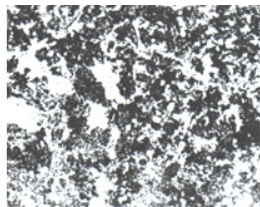


е

Рис. 1 – Распределение твердости по длине (а, в, д) и сечению (б, г, е) проб после термической обработки по режимам: а, б – I; в, г – II; д, е – III



а



б

Рис. 2 – Микроструктура стали 45X после термической обработки по режимам: а – I; б – III, x500

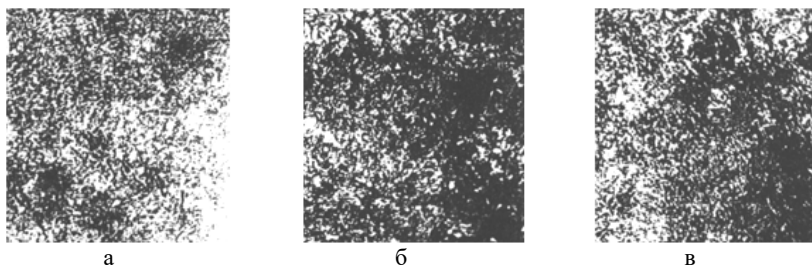


Рис. 3 – Микроструктура проб на глубине 1 мм от поверхности после термической обработки по режимам, х500: а – I; б - II; в- III, х500

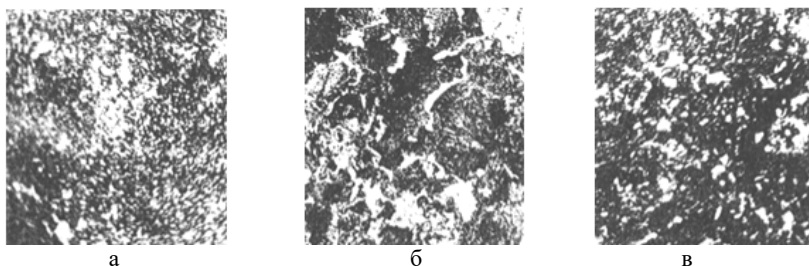


Рис. 4 – Микроструктура сердцевины проб после термической обработки по режимам, х500: а I; б - II; в – III, х500

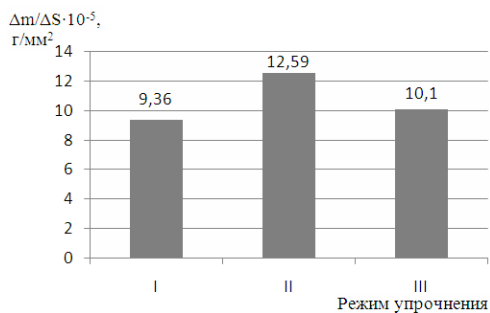


Рис. 5 – Зависимость износостойкости от режимов объемно-поверхностного упрочнения: I - полный отжиг, улучшение, закалка ТВЧ, отпуск; II - нормализация, закалка ТВЧ, отпуск; III – неполный отжиг, улучшение, закалка ТВЧ, отпуск. наибольшей износостойкостью обладают пробы, обработанные по режиму: полный отжиг, улучшение, закалка ТВЧ и завершающий отпуск

2. Распределение твердости по поверхности и сечению изделия носит равномерный характер, что может являться основой для прогноза дли-

тельной работоспособности. Наибольшей твердостью и износостойкостью обладают пробы, упрочненные по режиму, включающему полный отжиг, последующее улучшение, закалку ТВЧ и завершающий отпуск.

3. Введение в технологический процесс изготовления тяжелонагруженных деталей металлургического оборудования комбинированной термической обработки позволяет корректировать значимые размеры за счёт прогнозируемых объёмных изменений при индукционной закалке и низком отпуске, а также благодаря этому использовать размерное термическое восстановление изношенных при первичной эксплуатации деталей.

4. Разработанная технология объемно-поверхностного упрочнения деталей металлургического оборудования позволяет применять безникелевую сталь типа 45X для изготовления тяжелонагруженных деталей металлургического оборудования, испытывающих при эксплуатации комплексные нагрузки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алімов В.І. Підвищення експлуатаційних властивостей ланок ланцюгів гірничошахтних конвеєрів / В.І. Алімов, А.П. Штихно, О.І. Шевелєв // Уголь України. – 2014. - № 4. – С. 10 – 14.
2. Алімов В.І. О перспективах использования низкоуглеродистых легированных сталей для элементов тяговых органов конвейеров / В.І. Алімов, Т.А. Щеголева // Вестн. ДонНАСА. – 2005. – № 4(52). – С.135–138.
3. Алімов В.І. Термічне відновлення радіальних розмірів деталей гідравліки шахтного кріплення / В.І. Алімов, М.В. Георгіаду, Л.О. Желтобрюх // Уголь України. – 2014. – № 5. – С. 34–38.
4. Алімов В.І. Концептуальна оцінка факторів розмірного термічного відновлення радіальних розмірів стержневих осесиметричних izdeliy / В.І. Алімов, М.В. Георгіаду, А.Б. Белевцов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013 - № 4 (102). - С. 135 – 143.
5. Алімов В.І. Автономне упрочнення деталей горношахтного обладнання / В.І. Алімов, М.В. Георгіаду, В.В. Зубенко // Уголь України. – 2015. – № 7–8. – С. 40–43.
6. Алімов В.І. Комбіноване об'ємно-поверхностне упрочнення важконавантажених деталей транспортного обладнання / В.І. Алімов, М.В. Георгіаду, В.В. Зубенко // Уголь України. – 2016. – № 4–5. – С. 22–25.
7. Пат. 17644 Україна, МПК(2006), G01N 3/56, G01N 17/00. Пристрій для випробувань на корозійно-абразивний знос / Алімов В.І., Штихно А.П., Афанасьєва М.В.; заявник Алімов В.І., патентовласник Донецький національний технічний університет; заявл. 28. 02. 2006, № u200602208 опубл. 16. 10. 2006, Бюл. № 10. – 4 с.
8. Пат. 27165 Україна, МПК(2007), G01N 3/56, G01N 17/00. Пристрій для випробувань на газово-абразивний знос / Алімов В.І., Штихно А.П., Афанасьєва М.В.; заявник Алімов В.І., патентовласник Донецький національний технічний університет; заявл. 16. 04. 2007, № u200704179 опубл. 25. 10. 2007, Бюл. № 7. – 4 с.

9. Пат. 49721 Україна, МПК(2009), G01N 3/56, G01N 17/00. Спосіб оцінки локальної зносостійкості металевих виробів / Алімов В.І., Шевелєв О.І., Георгіаду М.В., Педан Д.М., Шкляріков Д.Є.; заявник Алімов В. І., патентовласник Алімов В.І.; заявл. 09. 11. 2009, № u200911384 опубл. 11. 05. 2010, Бюл. № 9. – 8 с.

10. Пат. 80394 Україна, МПК(2013), G01N 17/00. Пристрій для випробування на корозійно-ерозійне зношування / Дурягіна З.А., Алімов В.І., Цигилик Н.В., Підкова В.Я., Георгіаду М.В., Ольшевська С.О.; заявник Алімов В.І., патентовласник Національний університет «Львівська політехніка»; заявл. 10. 12. 2012, № u201214075 опубл. 27. 05. 2013, Бюл. № 10. – 2 с.

***Alimov V.I., Georgiadou M.V., Shevelev A.I. Volume-surface hardening and dimensional restoration of details of metallurgical equipment.***

*The microstructure, properties and wear resistance of the details of metallurgical equipment, made of alloy structural steels was learned. A volume-surface hardening using high-frequency currents to yield a solid and wear-resistant surface and the viscous core, which allows to apply less scarce steel. The results can be used in the field heavy-duty steel reinforcement and restoration worn parts workers sizes.*

**Keywords:** *hardening, tempering, high-frequency currents, improved, annealing, hardness, microstructure, restoration.*

Алімов В.І. – д-р техн. наук, професор Донецького національного технічного університета, г. Донецьк  
e-mail: alim41@mail.ru

Георгіаду М.В. – старший преподаватель Донецького національного технічного університета, г. Донецьк  
e-mail: geote@mail.ru

Шевелєв А.І. - д-р техн. наук, професор Донецького національного технічного університета, г. Донецьк



Алимов В.И.

## ПРОЯВЛЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА КОРРОЗИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ГАЗОВЫМИ И ЖИДКИМИ СРЕДАМИ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

Alimov V.I.

### MANIFESTATIONS AND CONSEQUENCES OF THE COLD PLASTIC DEFORMATION ON CORROSION INTERACTION WITH GAS AND LIQUID ENVIRONMENTS STEEL WIRE

Изучено влияние холодной деформации на склонность к газовой коррозии и коррозии в жидких средах проволочной продукции. Установлено, что предварительная холодная деформация способствует росту энергии активации процесса газовой коррозии и приводит к увеличению скорости окисления с повышением температуры; наследственное влияние структурных изменений в деформированной двухфазной стали на склонность к окислению при нагреве в аустенитную область проявляется при укороченном времени нагрева. При коррозии в жидких средах типично немонотонное изменение скорости коррозии, при этом коррозия в водопроводной воде из-за её большей агрессивности развивается интенсивнее; скорость электрохимической коррозии в растворе этилового спирта ниже, чем в остальных водных коррозионных средах

**Ключевые слова:** нагрев, предварительная холодная деформация, проволочная продукция, газовая коррозия, коррозия в жидких электропроводящих средах.

#### **Введение**

Значительные объёмы производства металлургических и сталепроволочных заводов занимает высокопрочная стальная проволока, используемая как в виде конечной продукции (для канатов, арматуры, металлокорда, спиц, специального режущего инструмента, метизов и т.п.), так и в виде полуфабрикатов (заготовки для игл, мелкогабаритных дыропробивных пуансонов, крепежа и пр.). При производстве проволочной продукции, как и многих других стальных изделий (ленты, полосы, прутков) процессы холодной пластической деформации и технологические процессы с газовыми и жидкими средами чередуются и поэтому важно знать, как последствия холодной деформации сказываются на взаимодействии деформированного металла с этими средами.

Одним из принципов наследственности в металлических сплавах как фундаментальной характеристики их поведения, сформулированных более 20 лет назад [1], является вероятность её значимого проявления при взаимодействии с коррозионноактивными средами, находящимися в разных агрегатных состояниях; такие системы являются гетерогенными и, в отличие от наследственности в объёме металла [2], наследственность в них во многом связана с состоянием сугубо поверхностного и приповерхностного слоёв сплава. Управляя расположением структурных элементов на поверхности взаимодействия «среда-сплав», можно свести к минимуму коррозионное разрушение поверхности сплава.

Ранее нами показано, что анизотропия в расположении и форме графитных частиц позволяет значимо повысить коррозионную стойкость чугуна и изделий из него в жидких коррозионноактивных средах [3]. Уменьшение коррозионных разрушений может быть достигнуто путём управления образующихся на поверхности слоёв оксидов [4]. Знание закономерностей протекания газовой коррозии дает возможность разработки технологии защиты от нее и оборудования для этого [5].

Принято считать [6], что влияние температуры нагрева на количественные показатели газовой коррозии определяется экспоненциальной зависимостью – уравнением Аррениуса, определяющими значимость в котором являются энергия активации  $Q$  и константа  $A$ . Энергия активации характеризует минимальную энергию атомов железа на поверхности твёрдого металла для прохождения процесса окисления. При увеличении энергии активации уменьшается доля реагирующего вещества при одних и тех же условиях, но скорость реакции увеличивается с ростом температуры [7]. Частотный фактор « $A$ », связанный с частотой столкновения частиц, участвующих в реакции, свидетельствует об увеличении числа взаимодействующих частиц с его увеличением [8]. Наличие в печной газовой атмосфере добавок углекислого газа и паров воды может менять кинетические закономерности газовой коррозии [9]. Закономерности сохраняются как для металла слиточного передела, так и для передела непрерывно литой заготовки [10].

**Целью работы** являлось изучение наследственного влияния степени предварительной холодной деформации на склонность к газовой коррозии и коррозии в жидких электропроводящих средах стальной проволоки, широко используемой при производстве высокопрочной проволочной продукции.

#### **Методика исследования**

В применении к условиям исследований уравнение Аррениуса имеет вид [6]:

$$K_m^+ = A' e^{-Q'/RT}, \quad (1)$$

где  $K_m^+$  - положительный показатель изменения массы;

$A'$  – постоянная;

$Q'$  – энергия активации, Дж;

$R = 8,31$  Дж/моль\*К – универсальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура, К.

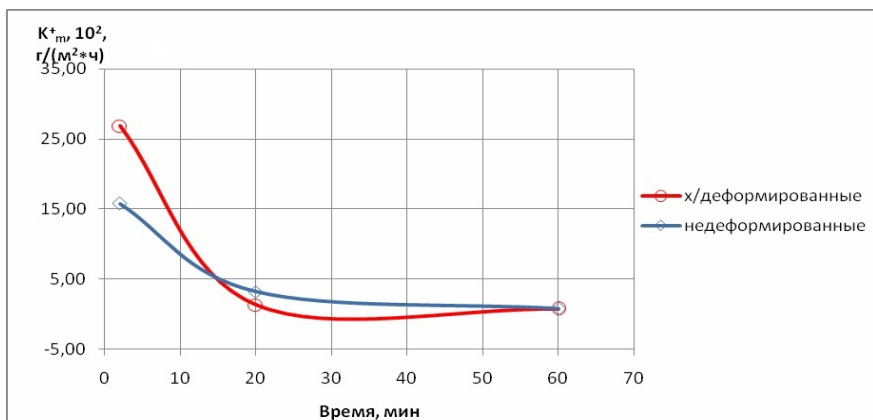
Величины  $A'$  и  $Q'$  не равны значениям  $A$  и  $Q$  для уравнения константы скорости химической реакции; при этом, по данным В.И. Архарова и Н.П. Жука, в интервале 730–1150°C сталь претерпевает аллотропическое превращение  $\beta\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$ , в результате чего наблюдается параболический закон роста окалина [5]:

$$\lg A' = \lg A/2, Q' = Q/2 \quad (2)$$

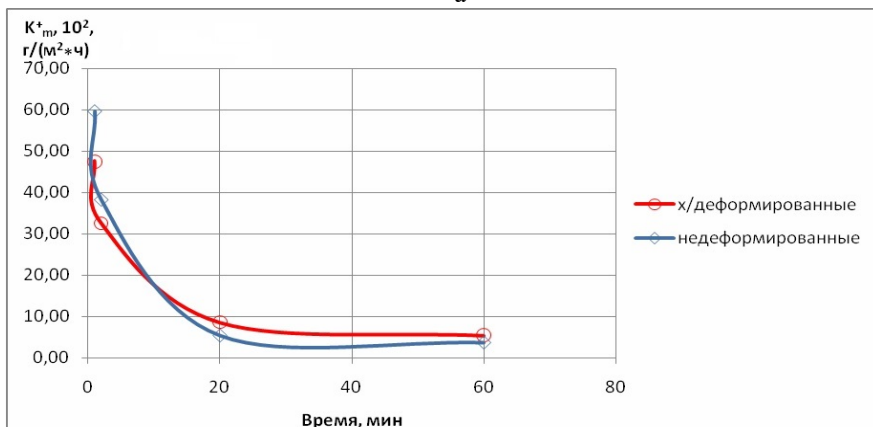
В настоящей работе проводили исследования на проволочных образцах диам. 2 мм из стали квазиэвтектоидного состава после предварительной холодной пластической деформации (ПХПД) со степенями 27–75 % и, для сравнения, аналогичных образцах с исходной сорбитной структурой (в состоянии после промежуточного патентирования). До испытаний образцы взвешивали на аналитических весах типа ВЛР-200 и измеряли их размеры с помощью микрометра. Все образцы укладывали в керамические закрытые тигли, помещали в печь СНОЛ с воздушной атмосферой, предварительно нагретую до 800 – 1000°C и выдерживали до 60 мин, после чего охлаждали на воздухе, проводили визуальный осмотр и повторно взвешивали. Далее рассчитывали положительный показатель  $K_m^+$ , зависящий от изменения массы, площади реагирующей поверхности образца и времени пребывания в газовой среде.

По рассчитанным показателям строили аналитические зависимости, приведенные на рис.1-2.

Интенсивность окисления со временем пребывания в печи затухает (рис. 1), что как для предварительно холоднодеформированной стали, так и для недеформированной, свидетельствует об образовании на начальных этапах окисления оксидов, удовлетворяющих критерию Пиллинга и Бедвортса и обладающих защитными свойствами на последующих



а

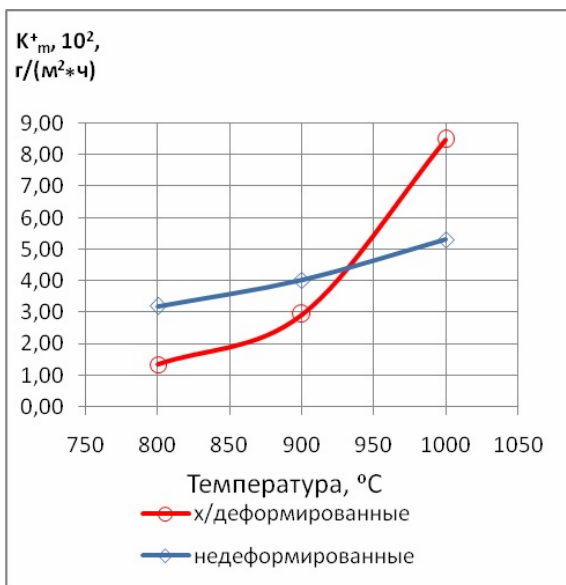


б

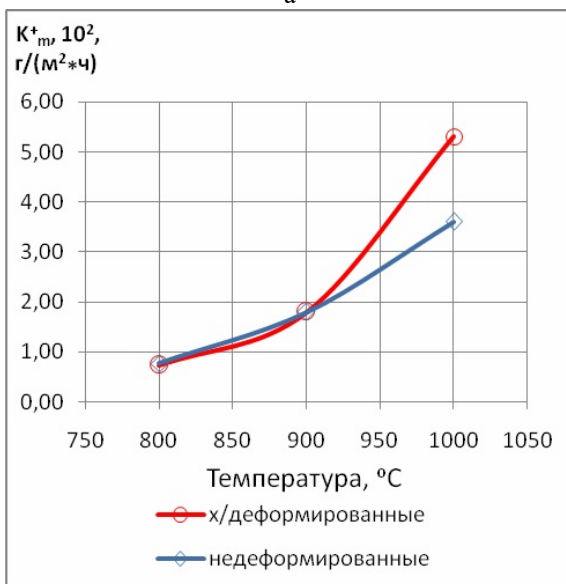
Рис. 1. Зависимость показателя газовой коррозии эвтектоидной стали от времени выдержки в печи и исходной обработки образцов при температуре нагрева, °С: а - 800, в - 1000

стадиях. Видно также, что влияние предварительной холодной деформации по мере увеличения выдержки нивелируется, что согласуется с принципами наследственности [1] в металлических сплавах.

Визуальный осмотр показал, что поверхность образцов, кратковременно выдержанных (1–2 мин) при температуре печи 800, 900°C, имела цвет от светло-желтого до темно-фиолетового: это свидетельствует о том, что в данных условиях образцы были нагреты не выше 300°C и ещё не прогрелись до заданной температуры.



а



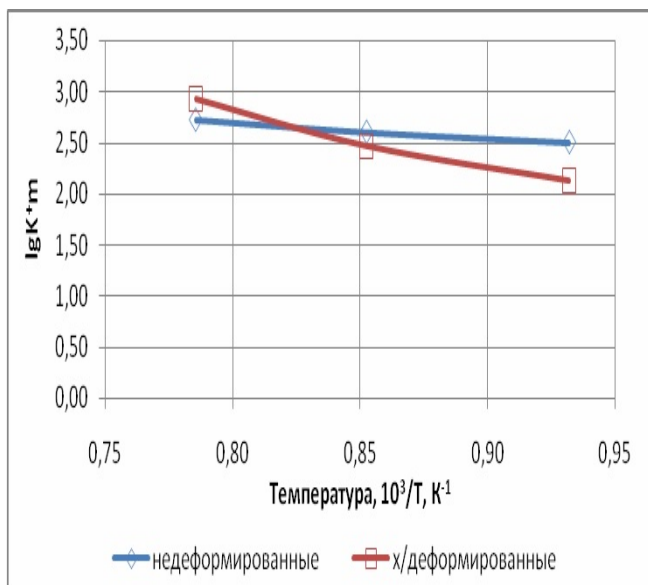
б

Рис. 2. Зависимость показателя газовой коррозии эвтектоидной стали от температуры нагрева и исходной обработки образцов после выдержки в печи, мин: а - 20, б - 60.

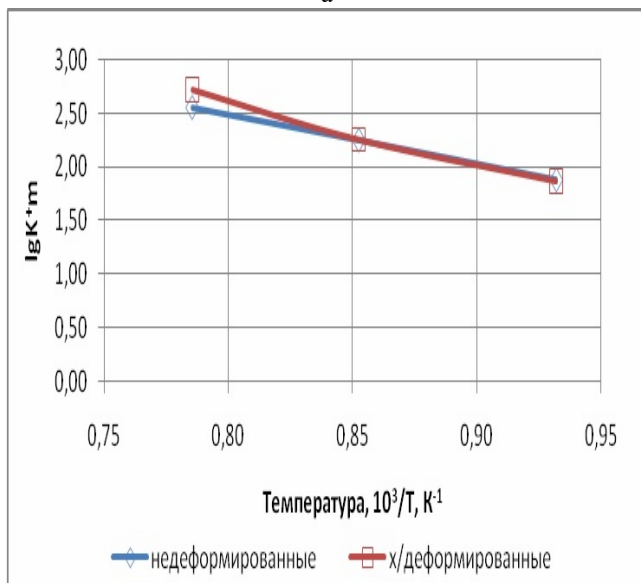
Эти данные были подтверждены специально поставленными экспериментами для подобных условий, которые показали, что температура печи достигается образцами не ранее, чем после 40-60 с выдержки. Следовательно, при коротких выдержках имеет место стадия неизотермического окисления со степенным законом роста окисной пленки с изменяющейся степенью (по Н.П. Жуку [6]), которая влияет на получение нетипичных температурных зависимостей при таких выдержках. При более длительных нагревах (20; 60 мин) зависимости близки к закономерностям, описываемым уравнением Аррениуса (рис. 2): это корректно подтверждается путём обработки данных в спрямляющих координатах (рис.3).

Такое поведение может быть связано с преимущественной ориентацией цементитных пластин вдоль направления деформации в процессе волочения проволоки. В недеформированных образцах участки цементитно-ферритной смеси располагаются разнонаправленно и, из-за разницы в электропроводности феррита и цементита, на поверхности образуется большое количество фазовых пар, облегчающих процесс протекания коррозии. В то же время вытягивание цементитных пластин вдоль направления волочения существенно снижает количество фазовых пар на поверхности образца, тем самым приводя к торможению коррозии при кратковременном воздействии газовой среды. При увеличении времени воздействия среды аккумулированная металлом во время предварительной деформации энергия вносит вклад в увеличение энергии активации  $A'$  и приводит к ускорению процесса окисления.

По графикам, характер которых удовлетворяет условиям Аррениуса (рис. 3 а, б), определяли величины постоянных  $A'$  и  $A$  и энергии активации  $Q'$  и  $Q$ . Величина  $A'$  численно равна значению положительного коррозионного показателя при  $1/T = 0$ ;  $Q' = 2,303 * R * \text{tg}\beta$  ( $\beta$  – угол, образованный прямой, построенной в координатах Аррениуса, с отрицательным направлением оси абсцисс). Значения  $A$  и  $Q$  рассчитывали по формуле (2). Полученные результаты приведены в таблице 1.



а



б

Рис. 3. Зависимость показателя газовой коррозии от температуры нагрева и исходной обработки образцов после выдержки в печи в спрямляющих координатах, мин: а - 20, б - 60

Таблица 1

**Изменение предэкспоненциального множителя и энергии активации в зависимости от исходного состояния металла образцов**

Время, мин	состояние образцов	$\lg A'$	$Q'$ , кДж	$\lg A$	$A, \frac{z}{M^2 \cdot t}$	$Q$ , кДж	уравнение Аррениуса
20	недеформированные	3,9	28,8	7,8	$63 \cdot 10^6$	57,6	$63 \cdot 10^{6*} e^{-7/T}$
	х/деформированные	7,2	104,5	14,4	$251 \cdot 10^{12}$	209,0	$251 \cdot 10^{12*} e^{-25/T}$
60	недеформированные	6,2	87,6	12,4	$2,5 \cdot 10^{12}$	175,2	$2,5 \cdot 10^{12*} e^{-21/T}$
	х/деформированные	7,3	112,1	14,6	$398 \cdot 10^{12}$	224,1	$398 \cdot 10^{12*} e^{-27/T}$

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что при одинаковом времени выдержки предварительная холодная деформация приводит к увеличению энергии активации, а также частотного фактора реакции А. Подобным образом влияет и увеличение времени выдержки при других равных условиях. Рост энергии активации и частотного фактора под влиянием предварительной холодной деформации приводит к ускорению окисления с ростом температуры (рис. 2), что согласуется с теоретическими предпосылками. При кратковременном воздействии коррозионной газовой среды предварительная холодная деформация способствует торможению окислительных процессов, однако с увеличением выдержки скорость коррозии предварительно холоднодеформированной двухфазной стали возрастает.

В процессе эксплуатации спицевой проволоки и подобной проволочной продукции из доэвтектоидных сталей с варьруемой долей структурно свободного феррита происходит взаимодействие с жидкими агрессивными средами, поэтому важно знать, в какой мере последствия холодной деформации в технологическом потоке производства сказываются на взаимодействии с водной средой различной кислотности и состава. В подобных случаях коррозия определяется как процесс и как результат самопроизвольного разрушения металлов при их химическом, электрохимическом или биохимическом взаимодействии с жидкой средой [6]; развивающаяся электрохимическая коррозия представляет собой нежелательный и непреднамеренный процесс, подчиняющийся законам электрохимической кинетики.

К числу важнейших факторов электрохимической коррозии следует прежде всего отнести концентрацию водородных ионов (рН – среды); рН оказывает сильное влияние на скорость электрохимической коррозии, изменяя потенциал катодных деполаризационных процессов, Кроме того



показатель рН электролита влияет на возможность образования окисных пленок и перенапряжение реакций на электродах [4-7].

В качестве материала для экспериментов брали проволочные образцы из среднеуглеродистой доэвтектодной стали диам.2 мм, используемой в качестве спицевой проволоки, для которых подбирали тип водной среды, оказывающей значимое влияние на коррозию холоднодеформированной проволоки квазиэвтектоидного состава [11]. Перед экспериментами изучали структуру, измеряли микротвердость и взвешивали. Затем готовили воду из разных источников - из реки Латорица, колодезную воду Донбасса, трубопроводную воду, 96%-й раствор этилового спирта в воде и определяли рН. Характеристика водных сред, используемых в качестве коррозионноактивных, приведена в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

**Характеристика коррозионноактивных водных сред**

Водная среда (район взятия проб)	Характеристика	Уровень рН, определенный по индикаторной бумаге
Трубопроводная вода	Содержит ионы хлора, бикарбонаты кальция, калия, магния, карбонаты, сульфаты натрия рН8	рН 6
р. Латорица (Закарпатье)	Обладает свойствами лечебной минеральной воды рН 6,68	рН 7
Колодезная вода Донбасса	Повышенное содержание карбонатов, сульфатов и хлоридов кальция, магния и натрия рН 6,8-7,2	рН 7
Раствор этилового спирта в воде	$C_2H_5OH$	рН 8

После этого поверхность исследуемых образцов обезжиривали спиртом и помещали их в ёмкости. Взвешивание и измерение размеров производили по описанной выше методике каждый день в течение определенного времени. На основе полученных данных определяли отрицательный показатель изменения массы [6],  $г/м^2ч$ :

$$K_m^- = \frac{\Delta m}{S\tau}, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь реагирующей с жидкой средой поверхности образца,  $m^2$ ;  
 $\tau$  - время взаимодействия, ч;  
 $\Delta m$  - изменение массы образцов, г.

По полученным данным строили графики зависимости отрицательного показателя коррозии ( $K_m$ ,  $г/м^2*ч$ ) от времени выдержки и типа водной среды (рис. 4).

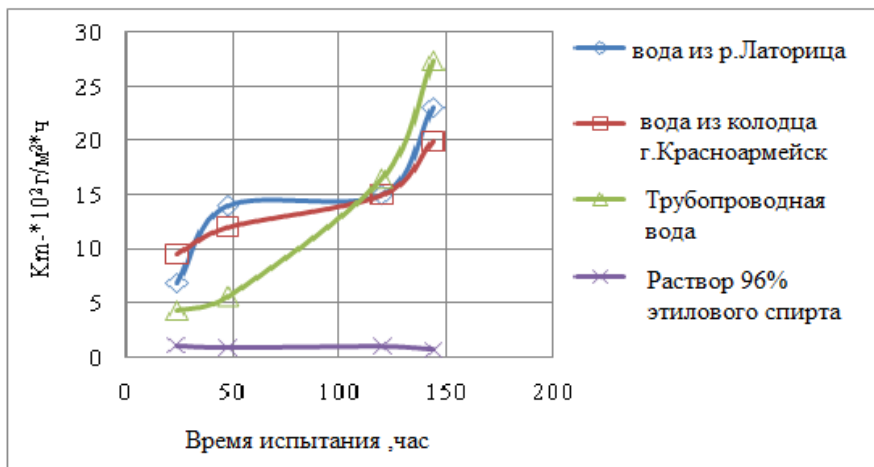


Рис. 4. Зависимость отрицательного показателя коррозии от времени выдержки и типа водной среды

Видно, что для спицевой проволоки типично немономонное изменение скорости коррозии, при этом коррозия в трубопроводной воде, приближающейся по кислотности к подкисленным средам, имеет более интенсивный характер развития, чем коррозия в нейтральных растворах, что свидетельствует о её большей агрессивности; при этом скорость электрохимической коррозии в увлажнённом этиловом спирте ниже, чем в остальных коррозионных средах.

## Выводы

1. Газовая коррозия при кратковременных выдержках для аустенитизации при высоких температурах, применяемых в технологии термообработки протяжённых изделий малого сечения, протекает в неизотермических условиях и не подчиняется классическим закономерностям газовой коррозии.

2. Предварительная холодная деформация способствует росту энергии активации процесса газовой коррозии и частотного фактора реакции,

что в свою очередь приводит к увеличению скорости окисления с повышением температуры при прочих равных условиях.

3. Наследственное влияние предварительной холодной деформации, проявляющееся при кратковременных нагревах, приводит к торможению коррозионного процесса по сравнению с недеформированным состоянием.

4. Для минимизации потерь металла от газовой коррозии при многократном переделе проволочной заготовки на проволоку необходима корректировка параметров аустенитизации перед патентированием в расплавах солей либо сыпучих средах в связи со степенью холодной пластической деформации передельной заготовки.

5. Спицевая проволока, в технологии производства которой применяется достаточно интенсивная холодная пластическая деформация, по коррозионной стойкости реагирует на состав водных сред с кислотностью, близкой к нейтральной, что следует учитывать при поставке подобной продукции потребителям с учётом их регионального местонахождения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алимов В.И. Разработка ресурсосберегающих технологий совмещенной деформационно-термической обработки для упрочнения стальных изделий с использованием проявлений наследственности и различных способов формообразования: диссертация докт. техн. наук: 05.16.01 / В.И. Алимов // Донец. нац. тех. ун-т. – Донецк, 1992. – 493 с.
2. Рябічева Л.О. Інструментальні матеріали / Л.О. Рябічева, О.П. Могильна. // Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2008. – 248 с.
3. Алимов В.И. Создание и использование анизотропии коррозионной устойчивости в высокоуглеродистых сплавах [Текст] / В.И. Алимов, Д.А. Баранов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №4/1 (46). – С. 62-70.
4. Biroasca S. Microstructural investigation of the oxide scale on low carbon steel / S. Biroasca, G.D. West, R.L. Higginson. // Metal 2005. – 24.-26.5.2005.
5. Патент на корисну модель Укр.№69219, В05С 3/00 Ванна для антикорозійної обробки арматурних стрижнів у потоці прокатки / В.І. Алімов, О.В. Крейда, О.М. Завгородній. № 201111301; заявлено 23.09.2011; опубл. 25.04.2012. Бюл. № 8. – 3 с.
6. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
7. Lebrini M., Robert F., Roos C. Adsorption Properties and Inhibition of C38 Steel Corrosion in Hydrochloric Solution by Some Indole Derivates: Temperature Effect, Activation Energies, and Thermodynamics of Adsorption / M. Lebrini, F. Robert, C. Roos. // International Journal of Corrosion. – 2013. – Vol. 2013. – P. 1-13.
8. Романовский Б.В. Основы химической кинетики. – М.: Экзамен, 2006. – 416 с.
9. Abuluwefa H. T. Kinetics of High Temperature Oxidation of High Carbon Steels in Multi-component Gases Approximating Industrial Steel Reheat Furnace / IMECS 2012. – 14.-16.3.2012.

10. Алимов В.И. Влияние различных факторов на склонность к общей коррозии стальных арматурных стержней из непрерывно литой заготовки / В.И. Алимов, Д.Н. Педан // Вісник Донбаської машинобудівної академії, 2010.- №3(20).-С.18-23.
11. Алимов В.И. Влияние типа водной среды на наследственную склонность к коррозии деформированной высокопрочной проволоки / В.И. Алимов, О.В. Пуш-кина, Т.В. Дзюба // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. - 2014. - Вип. 1(22). - С. 190-196.

***Alimov V.I. Manifestations and consequences of the cold plastic deformation on corrosion interaction with gas and liquid environments steel wire.***

*The influence of cold deformation on the tendency to gas corrosion and corrosion in liquid media wire products. It is established that the pre-cold deformation promotes the growth of the activation energy of the process gas corrosion and increases the rate of oxidation with increasing temperature; the hereditary influence of structural changes in a deformed dual phase steels on the propensity to oxidation during heating in the austenitic area is shown with a shortened heating time. If there is corrosion in liquid media is typically non-monotonic change in the corrosion rate, while corrosion in tap water because of its greater aggressiveness develops more intense; the speed of electro-chemical corrosion in the ethanol solution is lower than in other aqueous corrosive environments.*

**Keywords:** *heat, preliminary cold deformation of wire products, gas corrosion, corrosion in liquid conductive environments.*

Алимов В. И. – д-р техн.наук, профессор Донецкого национального технического университета, г. Донецк  
e-mail: alim41@mail.ru

Ершов В.М., Коробко Т.Б., Ершов М.В.

## ТОНКАЯ СТРУКТУРА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Ershov V.M., Korobko T.B., Ershov M.V.

### THIN STRUCTURE OF COARSE-FINE OF HARD WROUGHT HIGH CARBON STEEL

Приведены результаты рентгенографических исследований тонкой структуры холоднодеформированной высокоуглеродистой стали У8А. Показана роль холодной пластической деформации в изменении параметров тонкой структуры ферритной фазы двух структурных форм цементитных зерен эвтектоида.

**Ключевые слова:** перлит, пластическая деформация, тонкая структура феррита, рентгеновский анализ

#### Введение

Известно, что деформационное упрочнение металлических материалов является структурно чувствительным свойством [1]. Так, если в однофазных сплавах деформационное упрочнение материала определяется торможением дислокаций в теле зерна и на их границах, то в гетерофазных сплавах, помимо вышеуказанных факторов, важную роль играют особенности деформационных процессов в каждой из фаз, входящих в структуру сплава [1-4]. К примеру, в железоуглеродистых сталях, структура которых состоит как минимум из двух фаз: мягкой, пластичной ферритной и твердой малопластичной – цементитной, деформационное упрочнение возрастает под действием второй фазы. При этом цементитная фаза в стали может иметь различную геометрическую форму кристаллов: пластинчатую (пластинчатый перлит) и глобулярную (зернистый перлит), что также может влиять на эффект упрочнения.

В вышеуказанных работах было показано, что одновременно с деформацией ферритной фазы происходит заметная пластическая деформация и пластин цементита, что приводит к уменьшению их толщины и даже к частичному разрушению этих кристаллов. В результате пластической деформации на границе раздела фаз формируется ячеистая структура с устойчивыми скоплениями дислокаций [1– 3].

Оценка влияния формы кристаллов эвтектоида высокоуглеродистой стали У8А на тонкую структуру фаз при холодной пластической деформации имеет важное значение.

Литературные данные показывают, что холодная пластическая деформация вышеназванных структурных форм эвтектоида стали будет протекать за счет движения дислокаций как в ферритной, так и в цементитной фазах, причем последняя будет оказывать сильное барьерное действие этому движению [1,2]. В случае пластинчатой формы кристаллов эвтектоида, линии скольжения будут располагаться в ферритной фазе между пластинами цементита [2, 3]. Учитывая тот факт, что габитусная плоскость (001) цементита ориентирована параллельно плоскости (125) феррита, линии скольжения в ферритной фазе оказываются наклоненными по отношению к цементитным пластинкам на угол от  $20^{\circ}$  до  $70^{\circ}$ . При этом эффективная длина линий скольжения в феррите эвтектоида может составлять от 2 до 5 значений межпластиночного расстояния.

Иная картина структурных изменений наблюдается при пластической деформации перлита с глобулярным цементитом. Здесь линии скольжения в ферритной фазе имеют большую длину, чем в пластинчатом перлите и их протяженность ограничивается только расстоянием между зернами цементита. При этом одна часть дислокаций огибают карбидные включения за счет поперечного скольжения, а другая часть из них, образует скопление у границ цементитного зерна.

Кроме деформационных изменений в структуре фаз стали, магнитометрические измерения и методы ЯГР показали [3], что в процессе деформации высокоуглеродистых сталей часть атомов углерода выходит из кристаллической решетки цементита и оседает на дислокациях, образуя атмосферы Снука или Котрелла.

**Целью работы** является сопоставление параметров тонкой структуры ферритной фазы холоднодеформированной стали У8А, имеющей две структурные формы кристаллов цементитной фазы: пластинчатую и глобулярную.

#### **Методика исследования**

Для подготовки структуры стали к пластической деформации, партия цилиндрических образцов (диаметром 15 мм и высотой 12 мм) была разделена на две части. Одна часть образцов проходила полный отжиг ( $850^{\circ}\text{C}$ , 0,5 часа, охлаждение с печью) с целью получения структуры пластинчатого перлита, а другая – сфероидизирующий отжиг для получения в структуре эвтектоида глобулярной формы цементита. Микроструктурный анализ термообработанных образцов выполненный на оптическом микроскопе МИМ – 8М, показал, что цементитные пластины и глобулы располагаются друг от друга на расстоянии 0,3 – 0,5 мкм (рис.1).

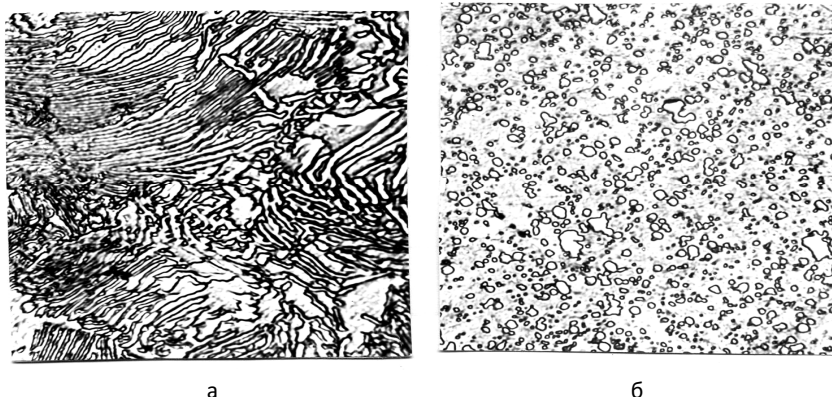


Рис. 1. Микроструктура образцов стали У8А после полного (а) и сфероидизирующего (б) отжигов,  $\times 1440$

Все образцы после термической обработки подвергали шлифовке и последующей холодной пластической деформации методом осадки на прессе П – 125 с дробными деформациями от 10 до 60%. После деформации образцы вновь шлифовали и травили в растворе азотной кислоты.

Подготовленные образцы рентгенографировали на дифрактометре ДРОН-1.5 в железном фильтрованном излучении трубки БСВ10. При этом на ленте электронного потенциометра записывали дифракционные линии (110) и (220) ферритной фазы и ряд линий цементита как в исходном состоянии, так и после пластической деформации. Дифрактограммы, записанные на ленте, планиметрировали, а затем рассчитывали ширину дифракционных линий.

Как и в нашей ранней работе [4], по значениям ширины дифракционных линий 2-х порядков отражения (110) и (220) феррита, рассчитывали параметры его тонкой структуры: размер блоков (областей когерентного рассеяния рентгеновских лучей – $D$ ) и уровень микроискажений кристаллической решетки –  $\Delta a/a$ .

Далее по методике, приведенной в работе [4], производили расчет плотности дислокаций  $\rho^{\perp}$  в ферритной фазе.

### Результаты исследований

Результаты расчета параметров тонкой структуры холоднодеформированной ферритной фазы для двух вышеназванных форм кристаллов цементита в эвтектоиде приведены на рис. 2.

Из данных рис. 2 следует, что с увеличением степени холодной пластической деформации происходит значительное уменьшение размера блоков, то есть протяженность областей практически свободных от дис-

локаций. Причем оказалось, что размер блока практически не зависит от формы кристаллов цементитных частиц, в то время как микронапряжения, напротив, оказываются зависимыми от исходной формы кристаллов цементита. Здесь видно, что с увеличением степени пластической деформации стали, микронапряжения в ферритной фазе с пластинчатой формой цементитных частиц нарастают значительно интенсивнее, чем для глобулярных кристаллов цементита. Вероятно, при пластической деформации структуры с глобулярной формой цементитных частиц, дислокации могут свободно огибать эти частицы за счет поперечного скольжения, а при пластинчатой форме кристаллов цементита, дислокации, передающие скольжение, тормозятся плоским фронтом кристаллов цементита. Последние скапливаются перед барьерами и, тем самым, существенно повышают микроискажения в ферритной фазе.

Результаты расчета плотности дислокаций ( $\rho_L$ ) в ферритной фазе холднодеформированной стали У8А приведены на рис. 3. Здесь же представлены данные по замеру твердости (HV) деформированных образцов.

Из данных рис. 3 следует, что плотность дислокаций в феррите образцов с глобулярным цементитом заметно выше, чем у образцов с пластинчатым цементитом. Это может быть объяснено генерирующим действием глобулярных частиц цементита в качестве источников дислокаций, в то время как ограниченное расстояние между пластинками цементита тормозит генерацию новых дислокаций в ферритной фазе. Подтверждение сказанному служит зависимость твердости деформированных образцов, где у образцов с глобулярным цементитом твердость заметно выше, чем у образцов с пластинчатым перлитом.

На втором этапе настоящей работы производили рентгенографический анализ цементитной фазы в деформированных образцах, имеющих две структурные формы перлита. Для рентгенографического анализа цементитной фазы были выбраны наиболее сильные дифракционные линии. Среди ряда линий в области малых дифракционных углов ( $2\theta = 50 - 600$ ) была выбрана одиночно расположенная линия (121), имеющая наибольшую интенсивность, положению которой не мешали другие линии как цементитной, так и ферритной фаз. На дифрактограммах этой линии определяли ее интенсивность (I) и ширину (B). Результаты измерений величин I и B деформированных образцов приведены на рис. 4.

Как следует из данных рис. 4, пластическая деформация образцов вызвала сильное уменьшение интенсивности выбранной дифракционной линии, что однозначно свидетельствует о развитии процесса растворения цементитной фазы при деформировании стали. Причем характер зависимости интенсивности линии от степени деформации одинаков как для пластинчатой, так и для глобулярной форм цементитной фазы. Одновременно с уменьшением интенсивности дифракционной линии (121), идет ее уширение. Это уширение линии цементита в области малых углов



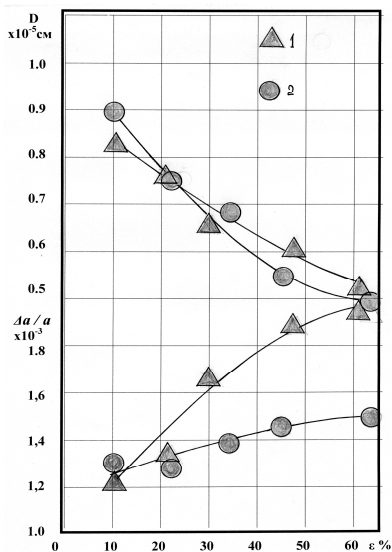


Рис. 2. Зависимость размера блока ( $D$ ) и уровня микроскажений кристаллической решетки феррита ( $\Delta a/a$ ) от степени холодной пластической деформации ( $\epsilon$ ) стали У8А с пластинчатой (1) и глобулярной (2) исходными формами кристаллов цементита в структуре

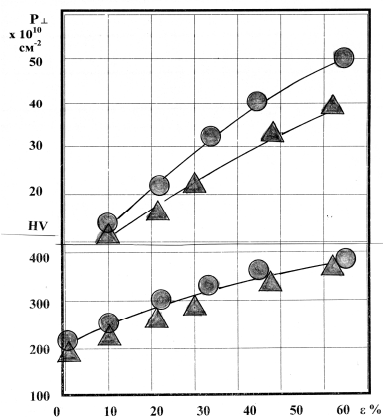


Рис. 3. Влияние степени холодной пластической деформации ( $\epsilon$ , %) на плотность дислокаций ( $P_{\perp}$ ) в феррите и твердость деформированных образцов (HV) стали У8А с пластинчатой и глобулярной формами цементитных кристаллов

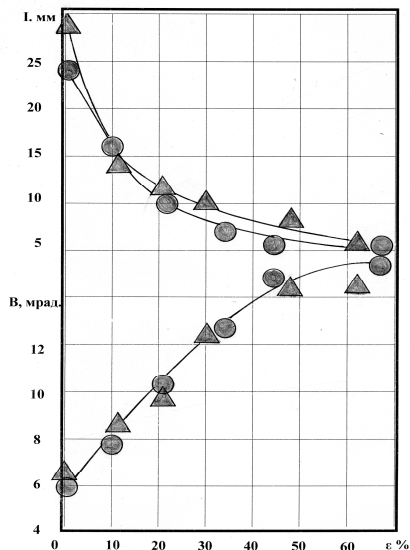


Рис. 4. Влияние степени холодной пластической деформации  $\epsilon$  % на интенсивность (I) и ширину (B) дифракционной линии (121) цементита стали У8А. Обозначения структурных форм перлита по рис. 2

может быть связано с измельчением структуры кристаллов цементита и с увеличением плотности дислокаций в этой фазе, на что указывалось в ряде работ [1-4]. Так, Гаврилюк В.Г. [3] считает, что пластическая деформация перлита вызывает образование ячеистой структуры с границами ячеек, расположенными у межфазовой поверхности. По мере увеличения степени пластической деформации, дислокационные границы ячеек насыщаются атомами углерода, а интенсивность распада постепенно уменьшается. Кроме того, часть атомов углерода, выходящая из цементита, диффундирует в микропоры и образует самостоятельную графитную фазу.

### Выводы

Экспериментально установлено, что при холодной пластической деформации стали У8А структурная форма кристаллов эвтектоида не влияет на измельчение блочной структуры ферритной фазы и плотность дислокаций в ней с ростом степени деформации растет, а уровень микроискажений кристаллической решетки ферритной фазы оказывается наибольшей у пластинчатого перлита.

Рентгеновский анализ цементитной фазы деформированного перлита показал возрастание дисперсности кристаллов фазы с ростом деформации

и возможное частичное их растворение, что безусловно требует дальнейшей детализации в последующих исследованиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб. - М.: Мир, 1972. – 408 с.
2. Гриднев В.Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В.Н. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.Н. Мешков – М.: Наукова Думка. 1974. – 224 с.
3. Гаврилюк В.Г. Распределение углерода в стали / В.Г. Гаврилюк. – К; Наукова Думка. 1987 – 208 с.
4. Ершов В.М. Тонкая структура холоднодеформированной малоуглеродистой стали - Алчевск, Лад. Сборник научных трудов сотрудников ДонГТУ, № 39, 2013 – 141-146 с.

***Ershov V.M., Korobko T.B., Ershov M.V. Thin structure of coarse-fine of hard wrought low carbon steel.***

*The brought results over of roentgenographys researches of coarse-fine of hard-wrought steel of V&A. The shown active role of flowage is in the change of parametrs of coarse-fine of ferritic phase depending on the geometrical form of cementit grains of eutectoid.*

***Keywords:*** pearlite, flowage, thin structure of ferrit, x-rayed analiz

Ершов В.М. канд. техн. наук., доцент Донбасского государственного технического университета, г.Алчевск  
e-mail: v\_yershova@mail.ru

Коробко Т.Б. канд. техн. наук, доцент Донбасского государственного технического университета, г.Алчевск

Ершов М.В. физик-инженер Донбасского государственного технического университета, г.Алчевск  
e-mail: myershoff@inbox.ru

**Пономарева Н.В.**

**ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ  
СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОТЛИВОК  
КОЛЕСНЫХ ЦЕНТРОВ**

**Ponomareva N.V.**

**JUSTIFICATION OF EXPEDIENCY OF IMPROVEMENT  
MANUFACTURING TECHNIQUES OF CASTING MOLDS FOR  
IMPROVEMENT CONDITIONS OF THE SURFACE OF CASTINGS  
OF THE WHEEL CENTERS**

Аргументированы высокие требования к состоянию поверхности центров колесных литых для подвижного состава железных дорог. На основе анализа преимуществ обоснован выбор  $\alpha - set$  – процесса для изготовления стержней и форм при производстве центров колесных литых.

**Ключевые слова:** подвижной состав, центры колесные литые, качество поверхности,  $\alpha - set$  – процесс.

**Введение**

Литейное производство занимает значительное место в изготовлении машин, в общем машиностроении литьем получают более 60% всех изделий [1]. Способ производства заготовок литьем позволяет получать самые сложные их формы, по конфигурации и размерам максимально приближенные к готовому изделию, с минимальным объемом механической обработки. Эти преимущества предопределяют экономический и технологический приоритет литья перед другими способами изготовления заготовок при условии, что качество отливки, связанное с плотностью ее стенок, уровнем механических свойств термически обработанного литого металла и технологичностью конструкции, должно гарантировать безаварийную работу изделия в течение всего эксплуатационного срока [2]. Широко применяются литые заготовки ответственного назначения, из которых изготавливают детали железнодорожного и морского транспорта, атомных электростанций и другие [2,3].

Важнейшим требованием к железной дороге и субъектам хозяйствования в данной отрасли является обеспечение безопасности движения поездов, безопасности пассажиров и обслуживающего персонала. Эксплу-

атационная прочность несущих конструкций подвижного состава железных дорог непосредственно связана с безопасностью поездов. Ответственные детали в большинстве случаев в эксплуатации выходят из строя в результате разрушения усталостного характера [4,5,6]. Как известно, усталостью материалов называется явление разрушения в результате постепенного накопления повреждений, приводящих к возникновению усталостной трещины при многократном повторении нагружений. Способность металлов сопротивляться разрушению при действии повторно-переменных напряжений называется выносливостью материала. На предел выносливости материала кроме характеристики цикла влияет множество факторов: концентраторы напряжений, размеры детали, состояние поверхности, температура, химический состав материала, окружающая среда, ориентированность кристаллов и др. [7].

В локомотивостроении, при изготовлении колесных пар, широко применяются составные ходовые колеса. Так, при изготовлении составного колеса тепловоза 2ТЭ116 используется дисковый литой колесный центр, изготавливаемый в соответствии с [8]. Учитывая особую ответственность колесной пары в обеспечении безопасности движения, к ее элементам, в соответствии с [9], предъявляются высокие требования, в том числе сопротивление усталости оси и колес (колесных центров).

При циклическом нагружении поверхностные слои материала элемента конструкции оказываются более напряженными чем внутренние (в частности это происходит при изгибе и кручении) [8]. Плохое качество поверхности деталей конструкции приводит к снижению сопротивления усталости, поэтому усталостные трещины, как правило, начинают развиваться от поверхности [8]. Одной из особенностей использования литых колесных центров при формировании составных колес является минимальная механически обрабатываемая поверхность, только посадочные поверхности. Остальная поверхность колесного центра не подвергается механической обработке. Поэтому наличие концентраторов напряжения в виде дефектов, в первую очередь на поверхности отливки, неровностей поверхности отливки снижает сопротивление усталости центра колесного.

Длительное время при производстве отливки центра колесного подвижного состава железных дорог для изготовления стержней применялись песчано-глинистые смеси, а для облицовки формы применялись жидко-стекольные формовочные смеси по  $\text{CO}_2$  – процессу. На поверхности отливок центров колесных, изготовленных по этой технологии, часто имелись засоры, плены, пригары, газовые раковины и другие дефекты. В процессе заливки формы, при контакте с расплавом, формовочная смесь может разрушиться и частицы смеси попадают в расплав и после затвердевания остаются в виде песчаных включений. Песчаные включения могут возникать также путем попадания формовочной смеси в форму. Пес-

чаные включения могут быть, как наружными, так и находиться в теле отливки. Вследствие физического и химического взаимодействия формовочного материала с металлом и его окислами на поверхности отливки могут возникать трудно отделяемый специфический слой, называемый пригаром. Одной из причин образования горячих трещин в фасонных отливках являются механические напряжения, возникающие при затвердевании вследствие сопротивления формы или стержня.

Холоднотвердеющие смеси на основе отверждаемых кислотой фурановых смол имеют следующие недостатки: низкую живучесть, экологическую вредность, поверхность отливок насыщается азотом и имеет газовую пористость [10]. Растворители фурановых связующих и сера, содержащаяся в кислотных отвердителях, часто приводят к поверхностным дефектам, негативно влияя на окружающую среду, особенно при литье стали [11].

Допустимое исправление дефектов, согласно [8], требовало затрат и не обеспечивало хорошего качества поверхности отливок. Для того чтобы отливки центров колесных соответствовали современным требованиям потребителя и имели конкурентное преимущество в условиях рынка, возникла необходимость обратиться к новым технологиям, способствующим улучшению качества отливок центров колесных, в том числе их поверхности.

В работах [1,2] рассмотрены общие вопросы технологии фасонного литья, изготовления формы и стержней, приведены физико-химические свойства и составы исходных формовочных материалов, рассмотрены технологические свойства смесей, технологическая оснастка литейного производства, технология изготовления стальных отливок, в том числе ответственных. Изложены общие вопросы технологий холоднотвердеющих смесей, включая два принципиально разных типа материалов. Первый тип - это смеси, в состав которых входит связующее и отвердитель и который затвердевает без внешнего воздействия. Второй тип - смеси, затвердевающие под воздействием внешнего газообразного реагента, который продувают через стержень или форму. Публикации освещают процессы, основанные на применении холоднотвердеющих смесей. Сформулированы особенности и преимущества  $\alpha$  - set - и  $\beta$  - set - процессов. Resol-CO<sub>2</sub> - процесс создан как альтернатива Cold - box - amin и CO<sub>2</sub> - процессам. Смеси, используемые в Per - set - процессе имеют соотношение «живучесть-время протяжки (время достижения манипуляторной прочности)», близкое 0,5 - 0,6, тогда как у всех остальных смесей первого типа оно составляет 0,05 - 0,02 [13]. В публикациях отсутствует формализованное решение проблемы выбора процесса для изготовления конкретных отливок. Правильно выбранный процесс позволяет получать конкурентоспособную продукцию, что в условиях рыночных отношений имеет особо важное значение для получения положительных экономических результа-

тов. Для правильного выбора процесса необходим анализ свойств процессов, учитывать условия предприятия, существующий собственный и сторонний опыт.

**Целью работы** является обоснование выбора  $\alpha - set$  – процесса при изготовлении отливок колесных центров подвижного состава железных дорог.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ требований к состоянию поверхности центров колесных литых для подвижного состава железных дорог.

- на основе анализа преимуществ обосновать выбор  $\alpha - set$  – процесса для изготовления стержней и форм при производстве центров колесных литых для подвижного состава железных дорог.

### **Материалы и результаты исследования**

В настоящее время при производстве отливок для изготовления стержней и форм широко применяются холоднотвердеющие смеси по  $\alpha - set$  процессу благодаря, как хорошему качеству поверхности отливок, так и качеству металла, хорошим условиям труда и высокой производительности, чему способствуют многие факторы.

При  $\alpha - set$  – процессе извлечение моделей из стержневых ящиков происходит легко, как на начальной стадии отверждения смеси, так и на более поздней стадии. При отверждении смеси теплота не выделяется, поэтому поверхность моделей сохраняется в хорошем состоянии в течение длительного времени, особенно при нанесении на нее хороших модельных лаков. К моменту извлечения из оснастки связующее вещество настолько глубоко полимеризовано, что растворители противопопригарных покрытий не способны вновь растворить связующее. Хорошая текучесть смеси при заполнении формы способствует ее равномерному распределению в форме и стержневом ящике.

Центры колесные литые изготавливаются в соответствии с [10] из низкоуглеродистых сталей 20Л и 25 Л, температура плавления и заливки которых высокая. При  $\alpha - set$  – процессе связующее разлагается медленно и при высоких температурах, и давление газов в форме остается на низком уровне.  $\alpha - set$  – связующее полностью термически разлагается во время отливки, при литье стали, поэтому выбивка форм и стержней происходит легко.

Связующая система  $\alpha - set$  процесса не содержит серы, снижающей поверхностное натяжение металла, а также исключается насыщение поверхности отливок серой. При хорошем уплотнении смеси и использовании противопопригарных покрытий пригар на отливках образуется крайне редко. Под воздействием расплавленного металла сразу после начала за-

ливки температура поверхностного слоя формы повышается и происходит температурное затвердевание поверхностного слоя смеси. Прочность поверхностного слоя может возрасти в два раза, прежде чем начнется термическое разложение связующей смолы. Поэтому крайне редко возникают дефекты, связанные с размывом литниковой системы. При повышении температуры поверхностная плотность формы и стержня увеличивается под воздействием термической полимеризации до момента, когда связующее постепенно не станет пластичным и до его ступенчатого разложения с потерей прочности. Пластичность поверхностного слоя формы, особенно при высоких температурах литья стали способствует тому, что трещины возникают очень редко. Поверхность отливок из низкоуглеродистых сталей не науглероживается из-за отсутствия выделения блестящего углерода при разложении  $\alpha$  - set смолы и отвердителя. Очень низкое содержание азота в связующей системе в сочетании с медленным выделением газов после заливки значительно снижает опасность возникновения газовых раковин, особенно при литье стали [11].

В [11] отмечено беспроблемное извлечение формы из оснастки. Из-за отсутствия серы, снижающей поверхностное натяжение металла, при хорошем уплотнении смеси и использовании противопопригарных покрытий пригар на отливках образуется крайне редко.

При  $\alpha$  - set процессе в качестве связующего используется щелочная смола с низким содержанием свободных фенолов и формальдегида, что обуславливает малое выделение паров свободного фенола, формальдегида, а также метанола. При приготовлении смеси и заполнения форм смесь почти не имеет запаха. Выделение угарного газа, образующегося во время заливки в результате выгорания связующего, значительно меньше, чем при использовании других связующих систем. Терморазложение связующего вещества происходит медленно, и образующийся угарный газ постепенно перемешивается с окружающим воздухом и замеряемое вблизи формы содержание угарного газа оказывается низким [13].

На основании вышеизложенного, при производстве центров колесных литых для подвижного состава железных дорог в ОАО «Сталь» освоено изготовление стержней и форм по  $\alpha$  – set – процессу.

## **Выводы**

1. Для обеспечения высокого сопротивления усталости аргументировано высокие требования к состоянию поверхности центров колесных литых для подвижного состава железных дорог.

2. Обоснованным является производство отливок центров колесных с изготовлением стержней и форм по  $\alpha$  – set – процессу благодаря получению хорошего качества поверхности отливок и металла, снижению затрат на очистку и исправление дефектов поверхности.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Желібо Є.П. Основи технологій виробництва в галузях народного господарства / Є.П. Желібо, М.А.Овраменко, В.М. Буслик [та інш.] – К.: Кондор, 2009. – 520 с.
2. Назаратин В.В. Технология изготовления стальных отливок ответственного назначения / В.В. Назаратин. - М.: Машиностроение, 2006. – 234 с.
3. Филонов С.П. Тепловоз 2ТЭ116 / С.П. Филонов., А.И. Гибалов, Е.А. Никитин [и др.] // - М.: Транспорт, 1996. – 334с.
4. Тимофеева Л. Показники безпеки інфраструктури залізничного транспорту / Л. Тимофеева, Р. Бородай // Залізничний транспорт України. – 2010. - №3 - С. 10-12.
5. Пужалов В.В. Технічний регламент з безпеки інфраструктури залізничного транспорту / В.В. Пужалов, І.В. Терлецька, В.М. Соколов // Залізничний транспорт України. – 2010. - №3 - С. 5-9.
6. Дьомін Р.Ю. До оцінки втомної довговічності несучих конструкцій екіпажної частини локомотивів / Р.Ю. Дьомін, Г.Ю. Черняк // Залізничний транспорт України. – 2010. - №1 - С. 38-40.
7. Молотников В.Я. Курс сопротивления материалов / В.Я. Молотников – СПб.: Изд-во «Лань», 2006. – 384 с.
9. Центры колесные литые для подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия: ГОСТ 4491 – 86. – [введ. 1988-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 9 с.
10. Тяговий рухомий склад залізниць колії 1520 мм. Колісні пари. Загальні технічні умови: ДСТУ ГОСТ 11018:200. – [введ. 2006-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 17 с.
11. Жуковский С.С. Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей / С.С. Жуковский, А.М. Лясс. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
12. С.-J.Nybergh. AlpHaset процесс и его использование в России // Литейщик России. – 2002. – № 3 – с.35-42.
13. Болдин А.Н. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: Справочник / А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский [и др.]. – М.: Машиностроение, 2006. – 507 с.

***Ponomareva N.V. Justification of expediency of improvement manufacturing techniques of casting molds for improvement conditions of the surface of castings of the wheel centers.***

*High requirements to a condition of a surface of the centers of the wheel railroads, cast for a rolling stock, are reasoned. On the basis of the analysis of advantages the choice a - set - process for production of cores and forms by production of the centers wheel cast is reasonable.*

**Keywords:** *a rolling stock, the centers wheel cast, quality of a surface, a – set – process.*

Пономарева Н.В. – инженер ПАО «Лугансктепловоз», г.Луганск  
e-mail: kaf\_mater@mail.ru

Дубасов В.М., Могильная Е.П., Пономарева Н.В.

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА НАРУЖНЫХ ПРУЖИН ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Dubasov V.M., Mogilnaia E.P., Ponomareva N.V.

### INFLUENCE OF MODES OF HEAT TREATMENT ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF OUTWARD SPRINGS OF ROLLING STOCK

Изучены режимы термической обработки во время горячей навивки пружин с последующей закалкой. Приведены результаты опытных работ по определению оптимальных температур нагрева металла и термической обработки. Приведены результаты по определению температурного интервала отпуска пружин, замера твердости и микроструктуры.

**Ключевые слова:** марка стали 60С2ХФА, наружные трещины, закалка, отпуск, твердость, микроструктуры, контроль.

#### Введение

Пружины рессорного подвешивания магистральных тепловозов испытывают в работе многократные знакопеременные нагрузки и после снятия нагрузки должны полностью восстанавливать свои первоначальные размеры.

В связи с такими условиями работы металл, применяемый для изготовления пружин и рессор, должен обладать, кроме необходимой прочности в условиях статического, динамического или циклического нагружений, достаточно хорошей пластичности, высокими пределами упругости и выносливости и высокой релаксационной стойкостью, а при работе в агрессивных средах (атмосфере пара, морской воде и др.) должен быть также и коррозионностойким.

Как показывает работа [1] пружины большого сечения (диаметром >40 мм) целесообразно изготавливать из стали 60С2ХФА совместно легированная кремнием хромом и ванадием. Эта сталь характеризуется мелкозернистым строением и малой склонностью к росту зерна. Так по данным М. Ю. Эйфера, при повышении температуры нагрев от 840 до 1050° С зерно увеличивается с 8 балла до 7-6, а в интервале оптимальных температур закалики его величина сохраняется на уровне балла 8.

Авторы работы [2] считают, что одним из наиболее эффективных методов упрочнения сталей в настоящее время является термомеханическая

обработка. Она обеспечивает не только высокие значения прочности при удовлетворительной пластичности, но также и повышенную усталостную прочность, и высокий предел упругости и позволит значительно улучшить основные свойства пружинных сталей и качество упругих элементов

В работе [3], указано, что дополнительное легирование этих сталей, в первую очередь карбидообразующими элементами Cr, Mo, W, V, стабилизирующими субструктуру, должно привести к повышению сопротивления сталей малым пластическим деформациям и особенно релаксационной стойкости. Легирование карбидообразующими элементами должно способствовать успешному проведению термомеханической обработки благодаря замедленному протеканию рекристаллизационных процессов. Легирование сильно карбидообразующими элементами, в частности, ванадием в количестве большем 0,3% при достаточном содержании углерода приводит, кроме того, к явлению вторичной твердости [3], т. е. к дополнительному упрочнению мартенситной матрицы за счет выделения мелкодисперсных карбидов ванадия.

**Целью работы** является изучение влияния режимов термической обработки на структуру и свойства пружин рессорного подвешивания магистральных тепловозов.

#### **Методика исследования**

Изготовление пружин производится путем горячей навивки с последующей термической обработки. Операции навивки и закалки пружин производятся с одного нагрева. Температурный режим изготовления пружин производится по инструкции ОГМет. Нагрев под навивку - 950°C. Температура закалки – не ниже 870°C, температура отпуска – 520-610°C.

Для обеспечения качества пружин на ОАО "Холдинговая компания "Лугансктепловоз" выполнен ряд работ по выявлению брака наружных пружин рессорного подвешивания магистральных тепловозов типа ТЭ 116.

В процессе работы производились контрольные замеры твердости пружин в цехе и отбирались для исследования пружины, изготовленные по разным вариантам.

Контроль качества структуры производился на микрошлифах, подвергаемых травлению в 4%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте.

Определение микроструктуры основного металла производился с помощью металлографического микроскопа при увеличении  $\times 500$ , а поверхностной зоны и величины действительного аустенитного зерна при увеличении  $\times 100$ ,  $\times 500$ . Контроль аустенитного зерна производится при необходимости.

Оценка микроструктуры опытных пружин производилась путем сопоставления микроструктур с эталонами шкал №№ 1-2.

### **Результаты исследования**

Согласно инструкции по контролю качества микроструктура поверхностной зоны витков пружин может состоять из обезуглероженного слоя, переходящего в структуру основного металла [4].

При сквозной прокаливаемости витков пружин, изготавливаемых из стали марки 60С2ХФА и из прутков диаметром 36 мм микроструктура основного металла, наблюдаемая сразу за обезуглероженным слоем, должна соответствовать эталонам 1-3 и распространяться на глубину в соответствии с кривыми прокаливаемости (не менее 1/3 диаметра витка пружин). В остальной части сечения витка до центра, в основном металле допускается пластинчатые структуры (эталон 4-6). Эталон 4 не допускается для пружин пассажирских тепловозов.

Микроструктура основного металла должна состоять из троостомартенсита (эталон 1) или троостита (эталон 2), или троостосорбита (эталон 3) мелко или среднеигольчатого строения [5].

Пружина №1. Температура нагрева под закалку 950°C. Конец штанги подстужен до 900°C. Температура закалки пружины неравномерная: 3 витка - 830°C, остальные - 860°C. Металлографическим анализом установлено, что на витках (3,4 и 6), закаленных с температуры 830°C распределение твердости по сечению неравномерное, по сечению витков (1, 2, 5), закаленных с температуры 860°C – равномерное. Глубина частично обезуглероженного слоя – 0,27 мм. Микроструктура основного металла пружины №1 всех витков троостомартенсит (рис. 1).

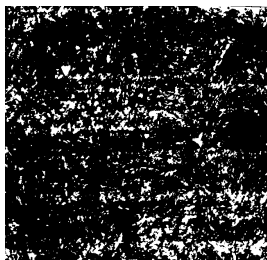


Рис. 1. Микроструктура основного металла пружины №1 всех витков – троостомартенсит,  $\times 500$

Пружина №2. Температура нагрева под навивку составляла 980°C. Металл прогрет равномерно. Температура закалки - 870°C. Распределение

твердости по сечению витков равномерное. Микроструктура поверхностной зоны витка соответствует эталону 2, рабочего витка – эталону 3. По действующей шкале эталонов микроструктур для контроля качества пружин, изготовленных по ГОСТ 1452-2011[3], эталоны 1,2 7-9 являются удовлетворительными, относятся к одной группе – зоне частичного обезуглероживания без наклепа, сходы между собой. Глубина частичного обезуглероживанного слоя опорного витка составляет 0, 18 мм, рабочего витка – 0,15 мм. Микроструктура основного металла опорного и рабочего витков одинакова – троостомартенсит (рис. 2).

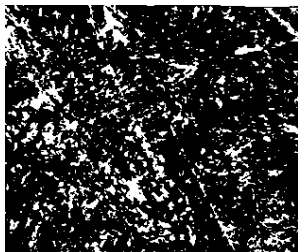


Рис. 2. Микроструктура основного металла опорного и рабочего витков,  $\times 500$

Пружина №3. Прогрев равномерный, навивка проводилась с  $980^{\circ}\text{C}$ . Температура закалки  $870^{\circ}\text{C}$ . Три витка отобраны после закалки, остальные после отпуска при  $510^{\circ}\text{C}$ . Распределение твердости по сечению образцов равномерное. Микроструктура сердцевины опорного витка – мартенситная, витков 2 и 3 троостомартенситная. Это можно объяснить меньшим сечением опорного витка, следовательно, большей скоростью охлаждения. Микроструктура сердцевины 4 и 3 – троостит (рис. 3).

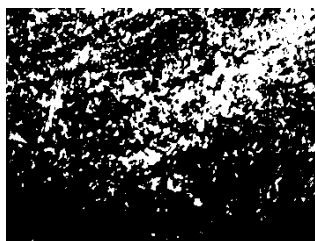


Рис. 3. Микроструктура сердцевины 4 и 3 – троостит,  $\times 500$

Для определения температурного интервала отпуска, в условиях ЦЗЛ проводился отпуск при разных температурах:  $500^{\circ}\text{C}$ ,  $520^{\circ}\text{C}$ ,  $540^{\circ}\text{C}$ ,  $650^{\circ}\text{C}$ ,  $580^{\circ}\text{C}$ ,  $600^{\circ}\text{C}$ .

Результаты замера твердости после отпуска приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Влияние температуры отпуска на твердость пружин**

Температура отпуска, °С	Диаметр отпечатка	Твердость, НВ
1	2	4
500	2,95-3,0	429-418
520	2,95-3,0	429-418
540	2,95-3,0	429-418
560	3,15	375
580	3,2	363
600	3,2	363

**Выводы**

Экспериментально установлено, что причинами брака пружин по твердости являются: нарушение технологической инструкции, неравномерный нагрев под навивку, заниженная температура закалки, отсутствие контроля температурного режима, несоблюдение режима отпуска.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы / А.Г. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1971. - 496 с.
2. Ильин С.И. Технология термической обработки сталей. Учебное пособие. / С.И. Ильин, Ю.Д. Корягин. // Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. — 120 с.
3. Околович Г.А. Свойства пружинных сталей после термообработки и деформационного упрочнения / Г.А. Околович, А.Г. Околович, А.М. Гурьев // XV Международная научно-техническая конференция студентов и молодых ученых. - Томск. - 2009. - С. 112–114.
4. МИ 08М58-03. Методические инструкции по контролю качества термической обработки пружин подвижного состава. - Луганск. - 2012. -17с.
5. ГОСТ 1452-2011. Пружины цилиндрические винтовые тележек и ударно-тяговых приборов подвижного состава железных дорог.

***Dubasov V.M., Mogilnaia E.P., Ponomareva N.V. Influence of modes of heat treatment on structure and properties of outward springs of rolling stock***

*The modes of heat treatment are studied during hot winding of springs with the subsequent tempering. Results over of the experienced works are brought on determination of optimal temperatures of heating of metal and heat treatment. Results over are brought on determination of temperature interval of vacation of springs, measuring of hardness and microstructure.*

**Keywords:** brand stills 60C2XФА, became, outward cracks, tempering, vacation, hardness, microstructures, control.

Дубасов В.М. – канд. техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск

e-mail: dubasov1955@mail.ru

Могильная Е.П. - канд. техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: mep0210@yandex.ua.

Пономарева Н.В. – инженер ПАО «Лугансктепловоз», г.Луганск  
e-mail: kaf\_mater@mail.ru

Макухин А.Г., Сыровой Г.В., Синдеева Е.В.

## МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОЧАСТИЦ С ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ

Makukhin A.G., Syrovoy G.V., Sindeeva E.V.

### THE MECHANISM OF INTERACTION OF NANOPARTICLES WITH THE POLYMER MATRIX

Проведен выбор и идентификация модификаторов эпоксидной матрицы, обусловленный сравнительной доступностью этих материалов и возможностью варьировать физико-химическими свойствами композиционных материалов использованием природных или выпускаемых в промышленных масштабах наномодификаторов. Анализ рентгенограмм серий образцов, модифицированных шунгитом, терморасширенным графитом и аэросилом показал значительное изменение в структуре полимерного композитного материала, а изменение интенсивности максимумов, характеризующих структурируемые блоки и расстояния между ними в полимере, в зависимости от количества вводимого модификатора дало основание к разработке механизма взаимодействия наномодификаторов с полимерной матрицей.

**Ключевые слова:** эпоксидная матрица, модификатор наночастицы, полимерный композит, рентгенограмма.

#### Введение

В современной авиационно-космической технике одной из проблем остаётся снижение веса конструкций летательных аппаратов. Замена металлических узлов на полимерные позволяет снизить вес конструкции аппаратов на 20-30%. Однако полимерные материалы должны сочетать в себе высокую прочность, стойкость к динамическим нагрузкам и обладать малым весом. Наиболее перспективными материалами становятся материалы на основе стекло- и углеволоконных наполнителей с наномодифицированным эпоксидным связующим. Проблемой является поиск эффективного наномодификатора, разработка технологии его введения в матрицу и поиск оптимальных технологий изготовления деталей и узлов конструкций летательных аппаратов.

Получению полимерных композиционных материалов с различными наномодификаторами в последнее десятилетие уделяется огромное внимание. Об этом свидетельствуют объёмы финансирования программ по нанотехнологиям ведущих стран мира [1]. Ежегодно правительство США инвестирует в развитие нанотехнологии около 4,4 млрд. дол., страны Ев-



ропы – 3,5 млрд. дол, страны Азии - около 4,0 млрд. дол. В России, Беларуси и Украине проводятся ежегодные научные конференции, такие как «Нано-2010», «Нанотехнологии и новые материалы», «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов», «Высокие технологии XXI века», на которых до половины докладов посвящены наномодифицированным полимерным материалам.

Первые результаты по получению и использованию наноуглеродных модификаторов приведены в работе американских ученых [2]. Нанотрубки, астралены, фуллерены использовались ими для модификации эпоксидных смол. Количество наномодификатора было от 20 до 60 %. Эти модификаторы необычайно дорогостоящи, технология их получения прецизионна. Однако, именно астралены и фуллерены - структурные разновидности углерода и в настоящее время широко изучаются. Особый интерес представляет  $C_{60}$ , предлагаемый учёными к применению от медицины до аэрокосмической промышленности [2-4].

Особенность наноуглерода заключается в поверхности частиц (до  $300 \text{ м}^2 / \text{г}$ ), являющейся активной за счёт свободных  $\pi$ -электронов.

Учёные России предлагают более дешевые методы получения наноуглерода [4, 5]. Получаемый ультрадисперсный алмазный порошок (УДА) содержит как алмазную, так и графитовую составляющую (УДА-Г) [4]. Наиболее перспективным для применения в промышленном масштабе предлагается шунгит - минерал, в состав которого входит от 30 до 70% наноуглерода [6].

**Целью работы** является усовершенствование технологии получения полимерных композиционных материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками посредством модификации наночастицами.

### **Методы исследований**

Модификация эпоксидной смолы  $C_{60}$ , УДА и шунгитом значительно улучшают физико-механические характеристики: по данным работ [2,4,6] предел прочности при разрыве и предел прочности при сдвиге увеличивается на 30%.

Однако, большинство авторов не рассматривают механизм взаимодействия наномодификаторов с матрицей на молекулярном уровне, ограничиваясь утверждениями изменением структуры, хотя не только экспериментальные результаты, но и теоретическая их интерпретация могут обеспечить рациональный технологический процесс.

Механизм взаимодействия модификаторов с полимерной матрицей рассматривали в двух планах: а) на молекулярном уровне и б) влияние структуры на физико-механические свойства нанокompозитов.

Учитывая, что метиленовые мостики, разделяющие ароматические ядра, нарушают сопряжение в полимерах, ухудшая их электрофизические свойства, многие исследователи изучали возможность получения полимеров, в которых ароматические циклы были бы разделены гетероатомами O, N, S и др., имеющими на внешних орбитах неспаренные электроны, взаимодействующие с  $\pi$ -электронами бензольных ядер и, следовательно, не нарушающие сопряжения.

В органических соединениях существуют кроме прочных химических связей водородные связи, как в самих молекулах, так и между цепями или блоками молекул.

Электростатическая теория указывает на взаимное влияние молекул. Если в поле одних молекул попадает другая молекула, то в зависимости от размеров и расстояний между ними ( $l$ ) интенсивность электростатического поля ( $E$ ) может достигать огромных размеров (1):

$$E = \frac{\varepsilon}{l^2}. \quad (1)$$

Поскольку введение модификатора осуществляется в твердой фазе, удобно рассмотреть взаимодействие модификатора с матрицей с точки зрения теории кристаллического поля и теории молекулярных орбиталей (ТМО).

### **Результаты исследований**

В работе решены следующие задачи: выбор и идентификация наноразмерных материалов (алмазный порошок, шунгит, аэросил) методом рентгенофазового анализа; отработка технологии введения различных наномодификаторов в эпоксидную матрицу; изучение структуры и физико-механических свойств образцов материалов; определение механизма взаимодействия наномодификаторов с эпоксидной матрицей и наполнителем.

ТМО рассматривает такие молекулярные орбитали имеющиеся в данном соединении, каково распределение электронной плотности этих орбиталей и какова энергия электронов на орбиталях. Молекулярные орбитали простираются по всему объёму молекулы и охватывают ядра всех атомов, входящих в молекулу. Поэтому физическая сущность ТМО может быть объяснена следующим образом – электрон может находиться в любой точке молекулы, хотя вблизи атомных ядер характер его движения такой, как в свободном атоме. Молекулярные орбитали включают s, p, d связи, но могут быть случаи и образования  $\pi$ -связей.

Молекула эпоксидной смолы кроме указанных активных групп – эпокси и гидроксильной имеет ароматические ядра с  $\pi$ -сопряженными связями и двойные, и одинарные С-Н связи.

При введении отвердителя происходит образование сеток, блоков, величина которых определяется различными условиями проведения эксперимента (температура смолы, отвердителя, нарушение стехиометрического соотношения «смола: отвердитель», режимов отверждения), а именно величина блоков, их совершенство и определяет механические свойства композиционного материала. Определить степень полимеризации можно путем инфракрасной спектроскопии.

Окружение молекулами, содержащими аминные группы, приводит к изменению линий валентных колебаний  $C=N$  их смещению, изменению интенсивности и появлению новых линий [9].

Механизм взаимодействия эпоксидной смолы с силикатами показал незначительное влияние  $SiO_2$  на электронную структуру молекул композита. Это объясняется отсутствием «свободных» электронов на устойчивой структуре полисиликата.

### **Выводы**

1. Проведен анализ современного состояния проблемы создания материала на основе полимерных матриц с наномодификатором и обосновано значительное влияние наномодификаторов различной природы на структуру полимерного композита.

2. Сделан выбор наномодификаторов, идентифицирована их структура и дисперсность.

3. Установлено, что образование более однородной структуры приводит к повышению прочностных свойств полимерных композитов.

4. Предложен механизм взаимодействия наномодификаторов с эпоксидной матрицей на молекулярном уровне.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ляшенко В.И. Большая книга о малом наномире / В.И. Ляшенко, И.В. Жихарев, К.В. Павлов [и др.]. - Луганск: «Альмаматер», 2008. -580 с.
2. A. Bogdanovich et al. Fabrication and Mechanical characterization of Carbon Nanotube Yarn, 3-D Braids and Their Composites. SAMPE Journal. Vol. 43№1, 2007, p.6-17.
3. Пономарев А.Н. Астролены - углеродные наномодификаторы фуллероидного типа / А.Н. Пономарев, В.А. Никитин, Б.А. Шахматов [и др.]. // Труды 4-й Международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов» - М.: Знание, 2006. -С. 147-154.
4. Пузырь А.П. Модифицированные наноалмазы детонационного синтеза: фракционирование, свойства, варианты применения / А.П. Пузырь, В.С. Бондарь и др. // Труды 4-й Международной конференции «Теория и практика технологий произ-

водства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов» - М.: Знание, 2006. -С. 649-653.

5. Шпак А.П. Синтез углеродных наноматериалов электровзрывным методом. «НАНО-2008», Минск / А.П. Шпак, А.Д. Рудь и др. // Материалы конференции, «Наноструктурные материалы»- Минск, 2008. -С.148-156.

6. Гуняев Г.М. Использование природных шунгитов для упрочнения и придания проводящих свойств конструкционным углепластикам / Г.М. Гуняев, Г.В. Начина, И.А. Ковалевский // Труды 4-й Международной конференции «Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов» - М.: Знание, 2006. -С. 102-106.

7. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов - М.: Изд-во физмат литературы, 1961,- 863 с.

8. Уманский Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.] - М.: Metallurgia, 1982, - 631 с.

9. Букетов А.А. Закономірності впливу обробки енергетичними полями зв'язуючого і наповнювача на властивості епоксикомпозитних матеріалів для захисних покриттів / А.А. Букетов // Автореферат докт. дис.: - К., 2007. -45 с.

***Makukhin A.G., Syrovoi G.V., Sindeeva E.V. The mechanism of interaction of nanoparticles with the polymer matrix.***

*Carried out selection and identification of modifiers of the epoxy matrix due to the comparative availability of these materials and the possibility to vary physical and chemical properties of composite materials using natural or produced on an industrial scale of nanomodifiers. X-ray analysis of series of samples modified by shungite, termomaslyanym graphite and Aerosil showed a significant change in the structure of polymeric composite material and changing the intensity of the peaks characterizing the structured blocks and the distance between them in the polymer, depending on the amount of added modifier gave rise to the development of the mechanism of interaction of nanomodifiers with the polymer matrix.*

**Keywords:** epoxy matrix, the modifier nanoparticles, polymer composite, roentgenogram.

Макухин А.Г.- канд. техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: siig@i.ua

Сыровой Г.В. - инженер Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: kafedraf@i.ua

Синдеева Е.В. - инженер Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: siig@i.ua

Сыровой Г.В., Ивин Н.В., Синдеева Е.В.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛЕЙНЕРА КОМПОЗИТНОГО БАЛЛОНА

Syrov G.V., Ivin N. V., Sindeeva E.V.

### DETERMINATION OF BEARING CAPACITY OF METAL LINER COMPOSITE CYLINDER

Проведен анализ публикаций по проектированию и испытаниям баллонов давления, в результате этого установлено, что на несущую способность композитного баллона влияют циклы нагружения. Для этого были изготовлены металлические образцы, которые были испытаны на цикличность и получена зависимость деформации металлического лейнера композитного баллона от числа циклов его нагружения.

**Ключевые слова:** композитные баллоны, сварочные образцы, композиционные материалы (КМ), лейнер, деформация, цикл нагружения.

#### Введение

В металлокомпозитном баллоне из-за разных предельных деформаций металла и пластика в металлической части баллона возникают значительные деформации, приводящие к снижению ресурса. Поэтому определение ресурса эксплуатации таких металлокомпозитных баллонов, в современных условиях, становится актуальной задачей.

Баллоны высокого давления (БВД) широко используются в системах функционирования и жизнеобеспечения всех типов авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ).

Конструктивно баллон состоит из тонкостенного герметизирующего лейнера из стали толщиной 0,5-3 мм, на который намотана внешняя силовая оболочка (типа «кокон») из композиционного материала (стеклоровинг или жгут «Армос 600»), смотри рис.1.

Особенностью таких баллонов, работающих под давлением длительное время, является требование сохранения ими герметичности. Существующие в настоящее время армирующие волокна и связующие обладают достаточно большой проницаемостью и, кроме того, при нагружении баллона внутренним давлением происходит растрескивание пластика вдоль волокон [1, 2]. Поэтому для создания герметичности необходимо введение слоя из изотропного материала [1, 3-4]. Этот слой может быть образован из различных материалов: резины, термопластов и металлов.

Используемые способы герметизации не всегда соответствуют предъявляемым требованиям. Так резиновый герметизирующий слой или слой специального герметика с течением времени теряет герметичность вследствие старения, слой термопласта можно использовать только в узком диапазоне температур, кроме того, такие герметики могут выделять летучие вещества, что недопустимо при использовании баллонов в системе жизнеобеспечения человека [5-6, 7]. В конструкциях с металлической фольгой возможна потеря устойчивости при опрессовке. Описанные конструкции изготавливаются с применением дополнительной оснастки (в виде различного рода оправок). Изготовление таких оправок трудоемко и в большинстве случаев не позволяет использовать связующее горячего отверждения, что сказывается на несущей способности баллона.

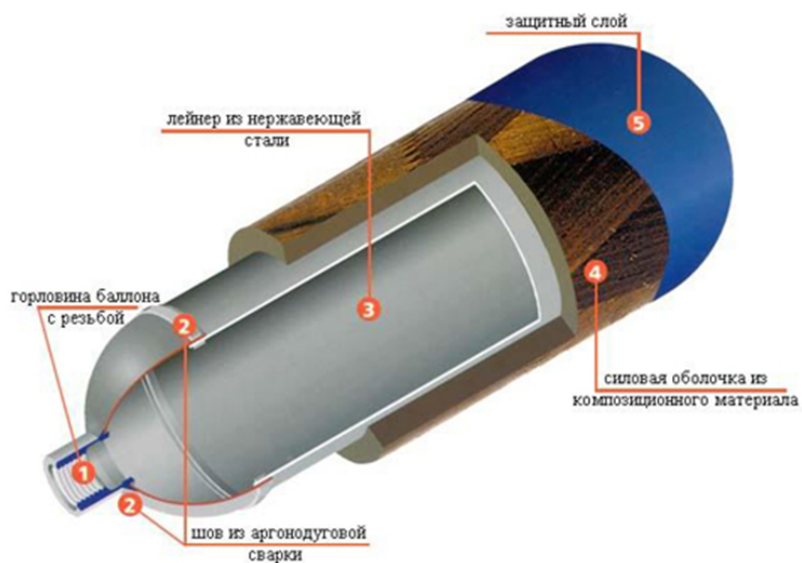


Рис. 1. Устройство металлокомпозитного баллона

**Целью работы** является определение несущей способности металлического лейнера композитного баллона на основе проведения усталостных испытаний сварных металлических образцов.

### Методы исследований

Существующие методы расчета металлических баллонов не учитывают факт нагружению внутренним давлением, при котором в металле лейнера возникают усталостные повреждения, приводящие к потере герметичности., так как за счет завышенного коэффициента безопасности в

стенке металлического баллона не возникают напряжения, превышающие предел усталости металла.

Одним из способов обеспечения герметичности является введение металлического слоя, с одной стороны, обладающего малой проницаемостью, химической стойкостью к веществу, находящемуся внутри сосуда, с другой (в отличие от резины и термопластов) – позволяющего использовать металлическую оболочку (лейнер) в качестве технологической оснастки при намотке АМ. При этом максимальной массовой эффективностью можно достигнуть в том случае, когда тонкостенная металлическая часть является только герметизирующим слоем (0,15...2,0 мм), но при эксплуатационных нагрузках в нем возникают значительные деформации, приводящие к усталостному разрушению металла.

Чтобы полностью реализовать свойства волокон в такой конструкции, например, волокон стекла, потребуется деформация с учетом коэффициента статической безопасности, по крайней мере 0,7%, но нет таких металлов, которые деформировались бы на такую величину и оставались при этом упругими. Следовательно, при каждом цикле нагружения металл нагружается до некоторой пластической деформации. Далее при нагрузке слой металлической тонкостенной оболочки будет сжат. При этом не должно произойти потери устойчивости тонкого металлического слоя. Проблема может быть решена двумя подходами: либо посредством использования достаточно толстой металлической оболочки, либо ведения такого количества АМ, чтобы деформации не превышали предела устойчивости и усталости металла. Конечно, оба эти способа ведут к снижению массовой эффективности металлокомпозитных баллонов, хотя при этом все еще превышает эффективность баллонов, полностью изготовленных из металла.

Следовательно, одним из подходов к решению проблемы при проектировании металлокомпозитных баллонов на заданный ресурс, является определение предельных усталостных деформаций металла, используемого при изготовлении лейнера баллона.

### **Результаты исследований**

Испытанию подвергались образцы из алюминиевого сплава АМГ-3 изготовленных с использованием аргонодуговой сваркой с флюсом и без флюса, а также образцов из АМц-М.

В связи с тем, что деформация, пришедшая на образец от нижнего захвата, распределяется непосредственно образцом между его рабочей частью и захватными частями образца, деформация рабочей части образца измерялась с помощью тензометрической скобы через тензометрический мост ЦТМ-5.

Для исключения потери устойчивости образца при сжатии было изготовлено приспособление из прозрачного органического стекла с окнами

для установки тензометрических скоб на образец. Для исключения сил трения между образцом и приспособлением полость приспособления заливалась машинным маслом.

В связи с тем, что в оболочке нагружение металлической части происходит отнулевым циклом, то и испытания образцом осуществлялись аналогично. Для этого образец зажимался в верхнем неподвижном захвате, вручную проворачивался вал двигателя до тех пор, пока нижний захват не оказывался в верхней точке. Контроль состояния нижнего захвата осуществляется индикатором часового типа. В этом состоянии образец зажимался в нижнем захвате. На образец устанавливалась тензометрическая скоба и в процессе нагружения образца производился замер относительной деформации в рабочей части.

Алюминиевый сплав АМг-3 (использовался для экспериментальных баллонов на НПО "Звезда") имеет невысокую прочность ( $\sigma_b = 250$  МПа), хорошую свариваемость, однако требует химического оксидирования внешней и внутренней поверхностей лейнера. Однако такую операцию плохо контролировать внутри баллона из-за малых отверстий в его штуцерах.

Алюминиевый сплав АМц-М обладает малой прочностью ( $\sigma_b = 130$  МПа), но прекрасно штампуются, раскатывается, позволяет формировать штуцер ротационным способом на холодно без образования усталостных трещин. Очень удобен при проведении экспериментальных работ по определению несущих свойств композита в оболочках, однако требует оксидной обработки поверхностей.

Значения полученных долговечностей от амплитуды относительных деформаций представлены на рис. 2, 3.

Обычно на каждом уровне деформаций испытывается несколько образцов, и по результатам испытаний определяется среднее значение разрушающего числа циклов. Именно это значения  $N$  и откладывается по оси абсцисс при построении кривых усталости. Но построенная таким образом кривая усталости может отражать только 50 % -ю вероятность разрушения (не разрушения) образца. Поэтому в последние годы интенсивно развиваются вероятностные методы расчетов на прочность при напряжениях (деформациях), переменных во времени. Эти методы основываются на вероятностной оценке рассеяния усталостных характеристик материала, определяемых путем испытания большой партии идентичных образцов. В [12] предлагается выражение для подсчета вероятности разрушения образцов на каждом уровне испытаний



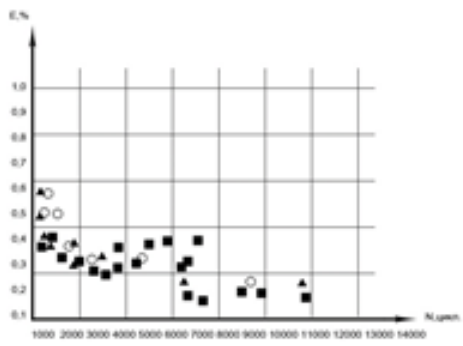


Рис. 2. – Усталостные испытания сварных образцов АМГ-3 и АМц-М с флюсом

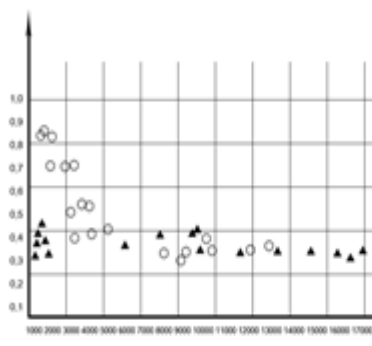


Рис. 3. – Усталостные испытания образцов АМГ-3 и АМц-М

$$P = \frac{i-0.5}{n} \quad (1)$$

где  $i$  – число образцов, разрушившихся при числе циклов меньше чем  $N$ ,  
 $n$  – число образцов испытываемой партии доведенных до разрушения на данном уровне деформаций.

Преобразуем выражение (1) для вероятности не разрушения образца на данном уровне деформаций и получим выражение для подсчета числа  $i$ ;

$$i = 0,5 - n(p - 1) \quad (2)$$

Затем проводим испытания комбинированных баллонов при эксплуатационных нагрузках и находим взаимосвязь полученных результатов для разработки методики проектирования баллонов с учетом циклического нагружения при заданном ресурсе (рис.4).

Исходя из того, что баллоны не должны терять герметичность при выбранном числе циклов и уровне деформации, кривая усталости должна проходить по крайним левым точкам значений разрушившихся образцов.

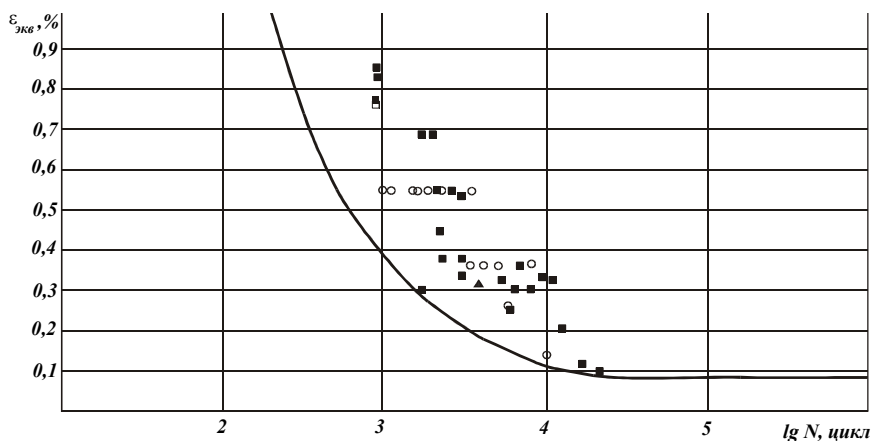


Рис. 4. – График полученных циклических испытаний металлокомпозитных баллонов

### Выводы

1. Проведен анализ современного состояния и перспектив изготовления и проектирования металлокомпозитных баллонов на заданный ресурс.
2. Поведены усталостные испытания металлических образцов алюминиевых сталей АМГ-3 и АМц-М и построены графики.
3. На основании графиков установлены деформации металла, соответствующие 5000 циклам назначенного ресурса.
4. Проведение натурных испытаний баллонов подтвердило соответствие установленного цикла нагружения при заданной деформации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Образцов И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов / И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков, - М.: Машиностроение, - 1977. - 144 с.
2. Цыплаков О.Г. Конструирование изделий из композиционных материалов / О.Г. Цыплаков - Л.: Машиностроение, 1984. - 140 с.
3. Томашевский В.Т. Моделирование условий возникновения технологических дефектов в структуре намоточных композитных полимерных материалов / В.Т. Томашевский, В.Н. Малыгин, В.С. Яковлев // Механика композитных материалов. - Рига: Зинатне, 1980, №5. - с. 895-900.
4. Томашевский В.Т. О научных основах технологических методов обеспечения бездефектной макроструктуры оболочек вращения, из армированных полимеров / В.Т. Томашевский // Техника, экономика, информация. Композиционные материалы и конструкции из них. Сборник ВИМИ, 1984, вып. 1-2, с. 95-103.

5. Азаревич, О.Я. Безпека життєдіяльності при проектуванні та виробництві аерокосмічних літальних апаратів. Підручник / О.Я. Азаревич, О.В. Гайдачук, В.Н. Кобрін [та ін.]. За ред. В.І. Рябкова, В.Н. Кобріна. – Харків.: Вид. ХАІ, 1997. – 366 с.
6. Циганков О.С., Технологічна діяльність космонавта / О.С. Циганков, В.М. Кобрін // Підручник. – Харків.: Вид. ХАІ, 1995. – 288с.
7. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности. Учебник для вузов / С.В. Белов, А.В. Ильницкая, А.Ф. Козьяков [и др.]. // Под общ. ред. С.В. Белова. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 1999. – 448 с.

***Syrovoi G.V., Ivin N.V., Sindeeva E.V. Determination of bearing capacity of metal liner composite cylinder.***

*The analysis of the publications on the design and testing of pressure cylinders, as a result, found that the bearing capacity of the composite cylinder is affected by the cycles of loading. For this purpose, were made of metal samples that have been tested on the cyclical nature and the dependence of the deformation of the metal liner composite cylinder from the number of cycles of loading.*

**Keywords:** *composite cylinders, welding samples, composite materials (KM), Leiner, deformation, loading cycle.*

Сыровой Г.В. – инженер Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: kafedraf@i.ua

Ивин Н.В. – инженер Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: kafedraf@i.ua

Синдеева Е.В. - инженер Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: siig@i.ua

Бурко В.В., Стоянов А.А.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПИРОИДНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КРИТЕРИЕВ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ

Burko V.V., Stoyanov A.A.

### SPIROID TRANSMISSIONS FOR THE DRIVES OF PRESS FORGING MACHINES

Приведены результаты экспериментального исследования спироидного зацепления повышенной нагрузочной способности с использованием критериев нагрузочной способности на основе контактной прочности. Рис. 4, ист. 5.

**Ключевые слова:** пресс, передача зацеплением, кривизна, критерии, нагрузочная способность.

#### Введение

Одной из основных задач повышения технико-экономических показателей промышленного оборудования, в частности кузнечно-прессового, является совершенствование конструкции механического привода, составной частью которого являются передачи зацеплением. Цилиндрические передачи здесь применяются в приводах главного движения, а червячные во вспомогательных приводах, в частности в механизмах регулировки закрытой высоты кривошипных прессов.

В работах [1,2] показана целесообразность применения спироидных передач взамен червячных в силу присущих им особенностей. Компоновка спироидной передачи в отношении взаимного расположения звеньев позволяет уменьшить габариты редуктора и его легче встроить в ограниченные размеры ползуна прессы, более высокая нагрузочная способность передачи также позволяет снизить габариты и вес редуктора.

Исходя из этих соображений, можно сделать вывод об актуальности задачи исследования спироидного зацепления с целью повышения нагрузочной способности и КПД.

Установлено, что нагрузочная способность зубчатых передач во многом зависит от геометрии рабочих поверхностей зубьев [3]. Ею же определяются показатели нагрузочной способности, в том числе и спироидных.

**Целью работы** является создание рациональной геометрии спиро-

идного зацепления по качественным показателям нагрузочной способности – в частности по минимальной приведенной кривизне в зацеплении.

**Материалы и результаты исследования.** В работе [2] приведены результаты исследований спироидного зацепления с цилиндрическим червяком, профиль витков которого синтезирован по минимальной приведенной кривизне в зацеплении.

Сравнительная оценка нагрузочной способности передач может производиться с использованием критериев нагрузочной способности из условия контактной прочности и на предотвращение заедания – это расчётный критерий контактной прочности Г.Ниманна, Ниманна-Дэвиса из условий гидродинамической теории смазки и критерий противозадирной стойкости Г.Блока [4].

Для проведения экспериментальных исследований в работе была принята ортогональная спироидная передача с цилиндрическим червяком, имеющая следующие основные геометрические параметры:

- межосевое расстояние  $a_w = 50$  мм ;
- передаточное число  $u = 36$  ;
- число заходов червяка  $z_1 = 1$  ;
- число зубьев спироидного колеса  $z_2 = 36$  ;
- модуль зацепления  $m = 3$  мм ;
- коэффициент диаметра червяка в базовой передаче  $q = 8$  .

Профиль витка червяка в осевом сечении выпукло-вогнутый. Боковые поверхности очерчены дугами окружностей, левая - выпуклая радиусом  $\rho_L = 11,67$  мм, с углом профиля на делительном цилиндре  $\alpha_L = 32,5^\circ$ , правая – вогнутая, имеет радиус  $\rho_R = 15$  мм и угол профиля  $\alpha_R = 15^\circ$ . Внешний вид экспериментальной базовой передачи представлен на рис. 1.

При теоретическом исследовании зацепления установлена целесообразность для повышения нагрузочной способности увеличение диаметра червяка с соответствующей корректировкой геометрических параметров профиля – уменьшением радиуса и увеличением угла для предотвращения подрезания.

Результатами этих исследований явились выявленные закономерности, позволившие получить исходный контур передачи с увеличенным диаметром червяка ( $q = 14$ ).

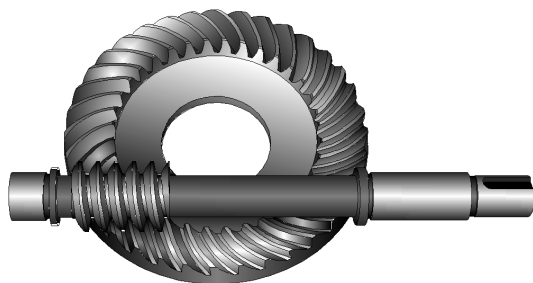


Рис. 1. Экспериментальная базовая спиroidная передача

Осевой профиль витка червяка этих передач также выпукло-вогнутый с параметрами  $\rho_L = 9,186 \text{ мм}$ ,  $\alpha_L = 41,43^\circ$ ,  $\rho_R = 15 \text{ мм}$ ,  $\alpha_R = 10^\circ$ . Внешний вид синтезированной по минимальной приведенной кривизне передачи представлен рис. 2.

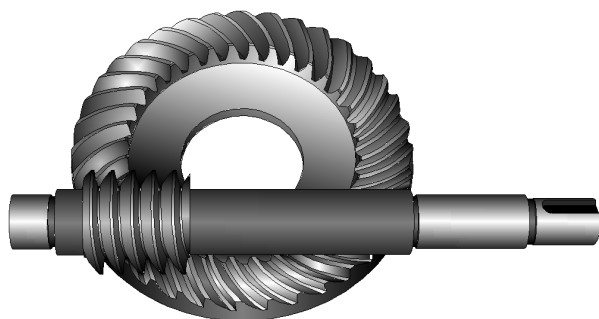


Рис. 2. Экспериментальная спиroidная передача с увеличенным диаметром червяка

Венцы экспериментальных спиroidных колес были изготовлены из безоловянной бронзы БРА9Ж3Л, материал спиroidных червяков – сталь 40Х, поверхностная твердость – HRC<sub>3</sub> 50...55.

Черновое нарезание витков червяков осуществлялось на универсальном токарно-винторезном станке с помощью профильных резцов. Чистовое формообразование производилось на резьбошлифовальном станке 5822М, а также на резьбошлифовальном станке "Klingelnberg" HSS-350, имеющем специальное приспособление для правки шлифовального круга с помощью кулачков-копиров.

Нарезание зубьев экспериментальных спиroidных колес производи-

лось зубофрезерованием с помощью резцов-летучек, изготовленных из стали P18 и имеющих твердость рабочих поверхностей HRC<sub>3</sub> 62...64 .

Изготовление венцов осуществлялось на зубофрезерном станке модели "Pfauter" HP-251, оснащенный протяжным суппортом для создания тангенциальной подачи. Проведенные исследования позволили установить характер контактирования в спироидном зацеплении.

Испытания проводились на лабораторном стенде, работающем по разомкнутому потоку мощности с использованием одного корпуса редуктора, который предусматривал воздушное охлаждение с принудительным обдувом и водяное с помощью змеевика, вмонтированного в масляную ванну.

Испытания проводились по следующей методике. Вначале производилось определение термической мощности редуктора, соответствующего его нагреву до температуры 95–98°С при естественном и принудительном воздушном охлаждении. Дальнейшие испытания продолжались до определения максимальной нагрузочной способности передачи, ограниченной разрушением зубьев, при этом использовалось водяное охлаждение редуктора. Нагружение передачи производилось ступенчато, приращение тормозного момента  $\Delta T_2$  составляло 25НМ. На каждой ступени нагружения производилась выдержка в течение нескольких часов до стабилизации значения КПД и температуры масла. Испытания начинались с нагрузки 75НМ и проводились до выявления термической мощности или максимальной нагрузочной способности передачи.

В процессе испытаний производился контроль температуры масла  $t_m^\circ$ , окружающего воздуха  $t_b^\circ$ , тормозного момента  $T_2$  и крутящего момента на валу электродвигателя  $T_1$ . КПД вычислялся по зависимости  $\eta = T_2/T_1$ .

Результаты испытаний представлены на рис. 3 и 4 в виде графиков зависимостей  $t_m^\circ - t_b^\circ = t(T_2)$  и  $\eta = \eta(T_2)$ . Рис. 3 характеризует левые стороны витков червяка, рис. 4 – правые (кривые 1 характеризуют базовую передачу, 2 – разработанную передачу, имеющую червяк увеличенного диаметра с вогнутым профилем правой стороны витка в осевом сечении, 3 – с выпуклым профилем правой стороны витка).

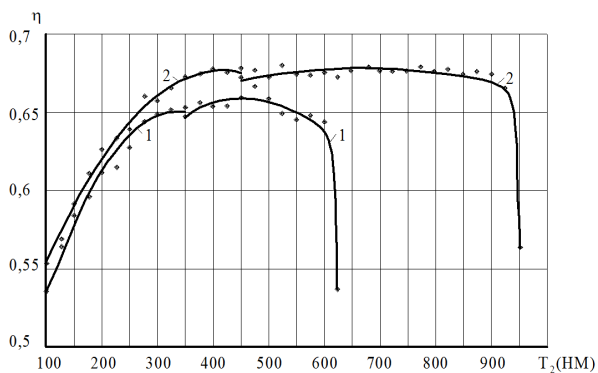
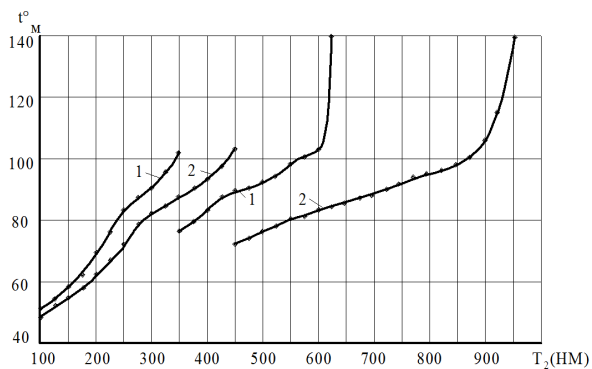


Рис. 3. Результаты экспериментального исследования левой стороны витка спироидных передач

Для получения достоверных результатов испытаниям было подвергнуто по несколько образцов экспериментальных передач. Данные испытаний были подвергнуты математической обработке методом наименьших квадратов. Разрывы в графиках соответствуют переходу от воздушного охлаждения редуктора к водяному.



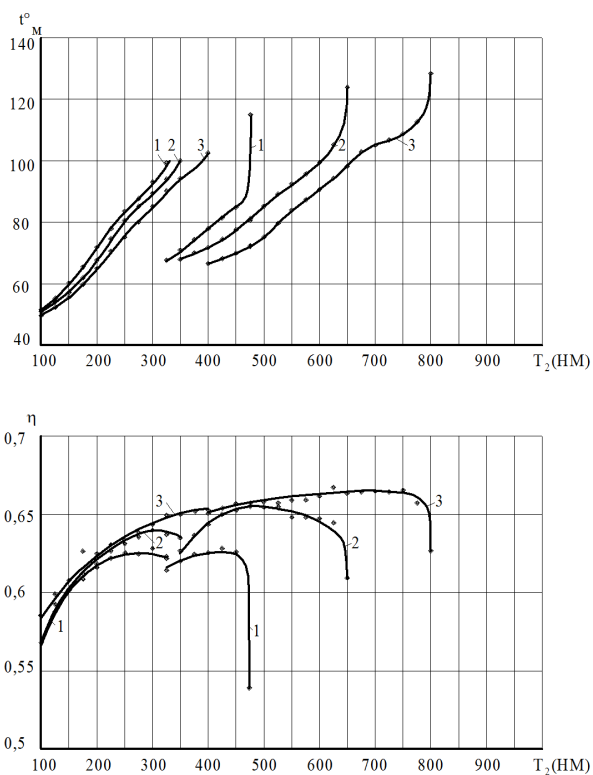


Рис. 4. Результаты экспериментального исследования правой стороны витка спироидных передач

## Выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить следующее:

1. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности исследования геометрии спироидных передач с увеличенным диаметром червяка с целью повышения нагрузочной способности. Так, в исследованной передаче нагрузочная способность, ограниченная термической мощностью редуктора, возросла до 40% с одновременным повышением КПД.

2. При использовании спироидных передач в приводах регулировки закрытой высоты кривошипных прессов их необходимо проектировать таким образом, чтобы левая сторона витка червяка, имеющая большую нагрузочную способность, использовалась при подъеме ползуна, а правая – при опускании.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шишов В.П. Спироидные передачи для приводов кузнечно-прессовых машин / В.П. Шишов, В.В. Бурко, А.А. Стоянов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2012. – №13 (184), частина 1. – С.79-84.
2. Шишов В.П. Высоконагруженные спироидные передачи для приводов кузнечно-прессового оборудования / В.П. Шишов, В.В. Бурко, А.А. Стоянов [и др.] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля №3 (145), частина 2. – Луганськ: Вид-во СНУ, 2010. – С. 35–39.
3. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф.Л. Литвин. – М. Изд-во «Наука». 1968.– 584 с.
4. Шишов В.П. Определение критериев сравнительной оценки нагрузочной способности спироидного зацепления / В.П. Шишов, В.В. Бурко, Я.В. Бурко // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр., частина 1. – Луганськ: Вид-во СУДУ, 2003. – С. 135–142.

***Burko V.V., Stoyanov A.A. Spiroid transmissions for the drives of press forging machines.***

*In the article the investigation of spiroid gearing is presented with the use of the criteria of loading ability on the basis of contact strength and form the condition of absence of seizing applicably to the drives of press forging equipment. Fig. 4. Ref. 5.*

**Keywords:** *press, transmission by gearing, curving, criteria, loading ability.*

Бурко В.В. – канд. техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: burko\_v@mail.ru

Стоянов А.А. – канд. техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: oomd@snu.edu.ua

**Никитин Ю.Н.**

## **ПЕРЕРАБОТКА МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ПОРОШКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ФЛОТАЦИЕЙ**

**Nikitin Yu.N.**

### **PROCESSING OF CUPRIFEROUS WASTE IN POWDERS MECHANICAL FLOTATION**

Разработана технология получения порошка из отходов медной кабельно-проводниковой продукции. Разработана механическая флотационная машина для разделения медного порошка и полимера. Исследованы свойства порошка, полученного из отходов медной кабельно-проводниковой продукции. Выполнен сравнительный анализ полученного порошка со стандартными порошками. Показано, что полученный порошок меди не технологичен для обработки давлением и не может применяться для изготовления порошковых изделий.

**Ключевые слова:** медный порошок, образец, отходы кабельно-проводниковой продукции, физико-технологические свойства, флотация.

#### **Введение**

В настоящее время прогресс в области качества продукции и повышения производительности технологических процессов связывают с использованием порошковых материалов, что делает особенно актуальным получение медных порошков из отходов кабельно-проводниковой продукции. И необходимость в развитии соответствующих высоких технологий переработки — очевидна [1-3].

При переработке отходов кабельной промышленности наибольшую проблему составляют массовые отходы относительно тонких (менее 1 мм<sup>2</sup>) токопроводящих жил в изоляции. Остатки меди в полиэтиленовых отходах, составляют по весу от 5-8 до 10-15% по массе полиэтиленовой фракции [2,3].

На наш взгляд, одним из наиболее перспективных методов переработки отходов кабельно-проводниковой продукции является метод флотационного разделения медного порошка и полимера. Применяемые современные методы и установки по флотационному разделению не обеспечивают разделение мелких фракций [4]. Актуальным для достижения этой цели является создание нового метода флотационного разделения медного порошка и полимера.

При флотации сближении в водной среде пузырька газа и гидрофобной поверхности частицы металла, адгезия которой к воде

меньше когезии воды, разделяющая их водная прослойка при достижении некоторой критической толщины становится неустойчивой и самопроизвольно прорывается. Этот этап завершается полным смачиванием частицы, обеспечивающим прочное слипание пузырька и частицы. Вследствие того, что плотность комплексов, или агрегатов "пузырьки — частицы", меньше плотности пульпы, они всплывают на ее поверхность и образуют пенный минерализованный слой, который удаляется из флотационной машины [4].

Высокая производительность порошкообразования и дисперсность продукта, экологическая чистота основного технологического процесса и возможность получения мелкодисперсных медных порошков определяют перспективу и актуальность данного направления исследования [1].

**Целью работы** является исследование медных порошковых материалов, полученных методом флотационного разделения медного порошка и полимера в среде флотореагентов из отходов кабельно-проводниковой продукции.

#### **Методика исследования**

Для получения порошка из отходов медной кабельно-проводниковой продукции использовали механическую флотационную машину для пенной сепарации (рис. 1) [5]. В исследованиях использовали: медный порошок марки, ПМС-2у ГОСТ 4960-75, ультрадисперсный (ТУ 1790-023-0722928-97) и пудру медную (ТУ 48-21-729-82 с изменениями 1-3), отходы кабельно-проводниковой продукции смесь дисперсной меди и полимерной крошки – отходы механической переработки кабельно-проводниковой продукции.

Технология получения порошка: резка кабеля; дробление кабеля диаметром до 1,35 мм; флотация смеси дисперсной меди и полимерной крошки; исследование свойств дисперсной меди [6].

Свойства порошка, полученного из отходов медной кабельно-проводниковой продукции, даны в табл. 1, 2, (рис. 2, 3).

Дисперсный порошок (табл. 1) по содержанию меди приближается к порошку медному ультрадисперсному (ТУ 1790-023-0722928-97) и существенно превышает по содержанию пудру и ПМС-2у. По содержанию железа уступает порошку медному ультрадисперсному. При дроблении небольшое количество железа из инструмента дробилки внедряется в дисперсный порошок. Содержание кислорода в дисперсном порошке меньше чем в порошке медном ультрадисперсном и ПМС-2у.

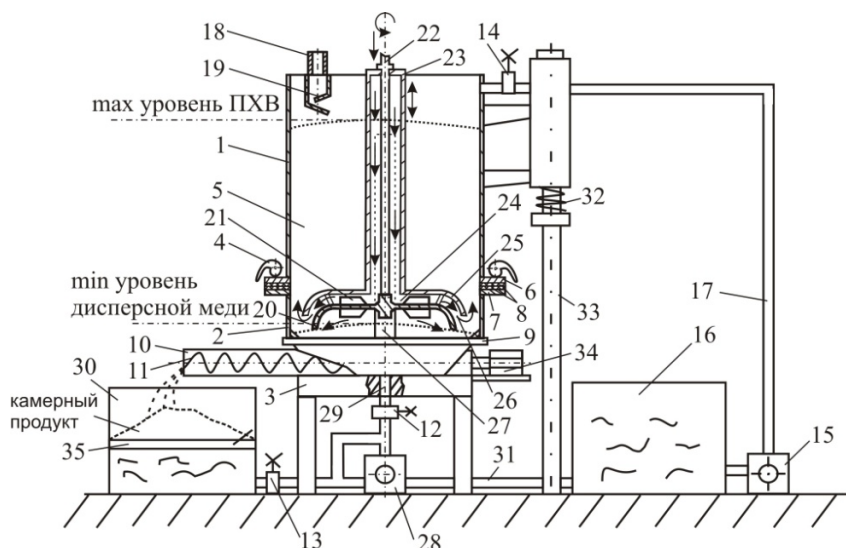


Рис. 1. Механическая флотационная машина для пенной сепарации дисперсной меди из отходов механической обработки лома и отходов кабельно-проводниковой продукции: 1 - верхняя подвижная часть корпуса; 2 - нижняя неподвижную часть корпуса; 3 – рама; 4 - зажим с эксцентриком; 5 – камера; 6 - нижний фланец; 7 - верхний фланец; 8 - резиновые прокладки; 9 – шибер; 10 - выгружающие устройство; 11 – шнек; 12,13,14 – задвижки; 15 - насос; 16 – резервуар; 17 - трубопровод; 18 - загрузочное приспособление; 19 – деки; 20 - роторный диск; 21- лопатки; 22 - вал; 23 – труба; 24 – аэратор; 25 – статор; 26 – раструб; 27 - обзорное окно; 28 – насос; 29 - фильтр 29; 30 – контейнер; 31 – трубопровод; 32 – пружина; 33 - стойка; 34 – электродвигатель

Дисперсная медь, полученная из отходов, состоит из частиц, размеры которых меньше, чем размеры частиц пудры, ПМС 2у за исключением порошка медного ультрадисперсного. По гранулометрическому составу дисперсная медь (табл. 1) относится к пудрам [7].

Наиболее высокую насыпную плотность имеет медный порошок ПМС 2у ГОСТ 4960-75 и пудра медная (ПМС) (ТУ 48-21-729-82 с изменениями 1-3) – наименьшую порошки медные ультрадисперсные (ТУ 1790-023-0722928-97) (табл. 2). Дисперсная медь по насыпной плотности занимает промежуточное значение. Насыпная плотность оказывает большое влияние на технологические свойства порошка: постоянство массы при засыпке в пресс-форму и усадку при спекании. Чем меньше насыпная плотность, тем больше усадка при спекании и хуже дозировка при прессовании. Знание этой величины очень существенно при конструировании пресс-форм. Порошки с малой насыпной плотностью требуют пресс-формы с большей полостью [7]. Очевидно, ни один из

представленных материалов не может использоваться при изготовлении изделий на основе меди.

Таблица 1

**Химический и гранулометрический состав порошка, полученного из отходов медной кабельно-проводниковой продукции**

Марка порошка	Содержание меди, %	Гранулометрический состав			
		Содержание частиц, % размером, мм			
		<0,071	0,045	<0,045	<0,0015
Пудра медная	>95,5	-	1,0	Остальное	
Дисперсная медь	99,5-99,9	-	-	0,5	остальное
ПМС-2у	99,7	99,5	-	85-90	
Порошок медный ультрадисперсный	99,75	-	-	остальное	-

Таблица 2

**Сравнительная характеристика плотностей порошков**

Тип порошка	Форма частиц	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Плотность утряски, г/см <sup>3</sup>
Пудра медная	лепестковая	1,8-2,2	3,4
ПМС 2у	дендритная	1,8-2,1	3.25
Порошок медный ультрадисперсный	близкую к сферической	Не менее 0,40	3,8
Дисперсная медь	кубическая, игольчатая, осколочная, пластинчатая	0,90-1,4	3,7

Форма частиц оказывает влияние на насыпную плотность и прессуемость порошка (плотность, прочность и однородность прессовки). Прессовки, изготовленные из частиц дендритной формы, имеют наибольшую прочность [7].

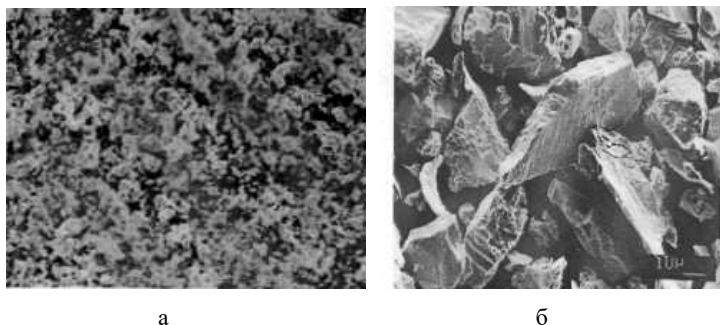


Рис. 2. Частицы порошков меди: а - (x400); б - (x1000)

Уплотняемость порошка определяется его свойствами: размером частиц, их формой, степенью наклепа и газонасыщением [7]. Сравнение уплотняемости порошков представлено на рис. 3.

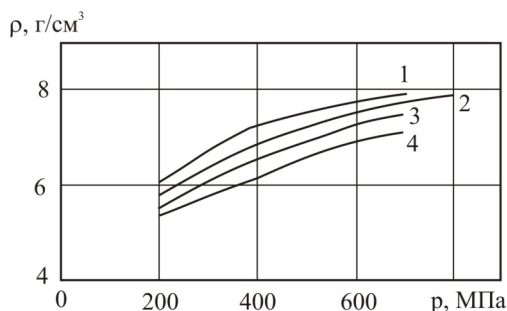


Рис. 3. Уплотняемость: 1 - пудра медная (ПМС) (ТУ 48-21-729-82 с изменениями 1-3); 2 - ПМС 2у ГОСТ 4960-75; 3 - дисперсная медь; 4 - Порошки медные ультрадисперсные (ТУ 1790-023-0722928-97)

Наклепанный, неотожженный, окисленный и газонасыщенный медный порошок имеет более низкую уплотняемость в сравнение с отожженным порошком, при тех же давлениях прессования из него получают прессовки меньшей плотности. Это можно объяснить сравнительно низкой пластичностью частиц вследствие наклепа и образования оксидной пленки на поверхности. Известно [7], что мелкодисперсные порошки с развитой формой частиц обладают невысокой уплотняемостью, тогда как порошки, имеющие большую насыпную плотность, уплотняются лучше. Кроме того, развитая поверхность частиц порошка способствует интенсивной адсорбции газа на поверхности, что снижает уплотняемость. Подтверждением выше сказанного являются экспериментальные данные по определению формы частиц (рис. 2) и насыпной плотности порошков (табл. 2).

## Выводы

Экспериментально установлены свойства порошка полученного из отходов медной кабельно-проводниковой продукции. Так как полученный порошок меди не технологичен для обработки давлением и не может применяться для изготовления порошковых изделий предлагается применять его в качестве добавок к техническим маслам и модификаторам литья, в производстве катализаторов, при изготовлении графитовых щеток, тормозных колодок, электродов для сварки, в химической промышленности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев Е.В. Состав и свойства медных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием: монография / Е.В. Агеев. - Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014.–143 с.
2. Герасин В.А. Как спасти полимер - металлические отходы // The Chemical Journal. Июль-август 2008. - С. 10-13.
3. Петруков О.П. Концепция оптимизации комплексного управления ТБО в Московской области [Текст] / О.П. Петруков, Л.Я. Шубов, Ф.Ф. Гаев // ТБО (Твердые бытовые отходы). 2007. № 9
4. Рубинштейн Ю.Б. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю. Б. Рубинштейн, В. И. Мелик-Гайказян, Н. В. Матвеевко [и др.]. — Г.: Недра, 1989.—304 с.
5. Пат. 52741 А Україна, МПК 13 В03D1/24. Механічна флотаційна машина / Рябічева Л.О., Никитін Ю.М., Усатюк Д.А., № 2234683087 Заявлено 12.04.12; Опубл. 15.07.13, Бюл.№7 - 19 с.
6. Пат. 47841 А Україна, МПК 13 В03D. Спосіб отримання мідної січки з лому і відходів кабельно-провідникової продукції з використанням флотогравітаційної обробки / Рябічева Л.О., Никитін Ю.М., Усатюк Д.А., № 2234683056 Заявлено 12.04.12; Опубл. 15.07.13, Бюл.№7 - 18 с.
7. Кипарисов С.С. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – М: Металлургия, 1991. – 468 с.

### ***Nikitin Yu.N. Processing of cupriferous waste in Powders mechanical flotation.***

*The technology of receiving powder from waste of copper cable and conduction products is developed. The mechanical unit cell is developed for division of copper powder and polymer. Properties of the powder received from waste of copper cable and conduction products are investigated. Comparative analysis of the received powder with standard powders is made. It is shown that the received powder of copper is not technological for pressure treatment and it cannot be applied to production of powder products.*

**Keywords:** *copper powder, sample, waste of cable and conduction products, physics-technological properties, flotation.*

Никитин Ю.Н. – канд.техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: kaf\_mater@mail.ru



Тарасенко О.В., Ивженко А.А., Креселюк Ю.В.

## К РАСЧЕТУ МАГНИТНОГО ПОТОКА МАССИВНОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ДЕТАЛИ ПРИ ЕЕ ЛОКАЛЬНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ

Tarasenko O.V., Ivgenko A.A., Kreselyuk Y.V.

## THE CALCULATION OF THE MAGNETIC FLUX IN A MASSIVE FERROMAGNETIC PARTS AS THE LOCAL MAGNETIZATION

Приводятся некоторые результаты теоретических исследований П – образной магнитной системы локального намагничивающего устройства. Рассматривается задача расчета магнитного поля внутри ферромагнитной детали, позволяющая оценить эффективность магнитной системы и произвести оптимизацию ее параметров. Рис. 2, ил. 4.

**Ключевые слова:** локальное намагничивающее устройство, магнитная система, магнитный поток.

### Введение

Аппараты намагничивания являются основой систем неразрушающего контроля ферромагнитных изделий: феррозондовых порошковых дефектоскопов, коэрцитиметров, структуроскопов, измерителей толщины покрытий деталей. Если малогабаритные детали намагничиваются в замкнутой магнитной цепи и расчет аппаратов намагничивания ведется методом расчета магнитных цепей, то намагничивание массивных деталей производится локально и применение метода магнитных цепей для их расчета становится недостаточным. Это обусловлено тем, что необходимо определить поле вектора намагниченности в исследуемой области ферромагнитной детали. Вектор намагниченности в этой области должен иметь определенное значение, которое задается требованиями неразрушающего контроля. Обычно параметры намагничивающего устройства определяются экспериментально или на основе опыта эксплуатации этих устройств и данных, полученных расчетным путем с помощью идеализированных моделей с принятием значительных допущений и упрощений. Поэтому ряд параметров магнитных систем намагничивающих устройств имеет завышенные значения. При учете существенной материалоемкости этих устройств и содержания цветных металлов порядка 10-15% от общей массы магнитной системы, даже сравнительное небольшое уменьшение их массы дает определенный экономический эффект. Следует также учиты-

вать, что устройства неразрушающего магнитного и электромагнитного контроля являются одними из наиболее распространенных аппаратов в сфере металлургического производства, тяжелого и транспортного машиностроения. Существует два критерия оптимальности размеров локального намагничивающего устройства (ЛНУ). Согласно одному критерию [1] оптимальными размерами ЛНУ являются такие величины  $2a$ ,  $2c$ ,  $2t$  рис.1 при которых напряженность на поверхности намагничиваемого материала является максимальной при определенном значении индукции в магнитопроводе ЛНУ.

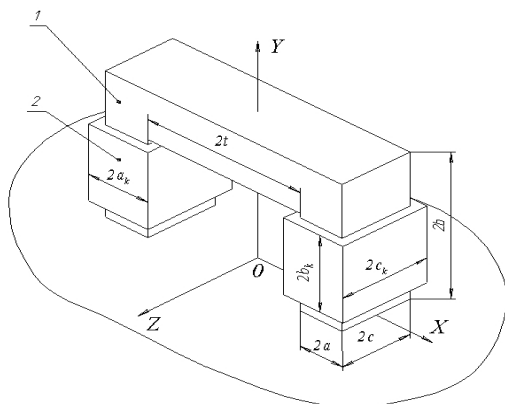


Рис.1. Локальное намагничивающее устройство:  
1 – магнитопровод, 2 – катушки

В [1] также отмечается, что оптимальные размеры магнитопровод ЛГУ не зависит от магнитных характеристик намагничиваемого материала. Однако это можно отнести к ненасыщенной магнитной системе.

На практике оптимальные размеры магнитной системы зависят не только от магнитных характеристик намагничиваемого изделия, но также от магнитных характеристик магнитопровода и от величины тока в обмотках катушек. Во [2] введен критерий оптимальности магнитной системы, под которым понимается отношение суммарного магнитного потока в изделии к магнитному потоку в сердечнике ЛНУ. Этот критерий более полно отражает эффективность намагничивания, так как величина напряженности на поверхности намагничиваемой детали связана с потоком в детали нелинейной зависимостью.

### Постановка задачи

Задачей теоретических исследований является определение магнитного потока в намагничиваемой детали как функции геометрических и

магнитных параметров ЛНУ и магнитных параметров намагничиваемой детали эта задача, ввиду простой геометрии системы, может быть решена без применения численных методов расчета магнитных полей.

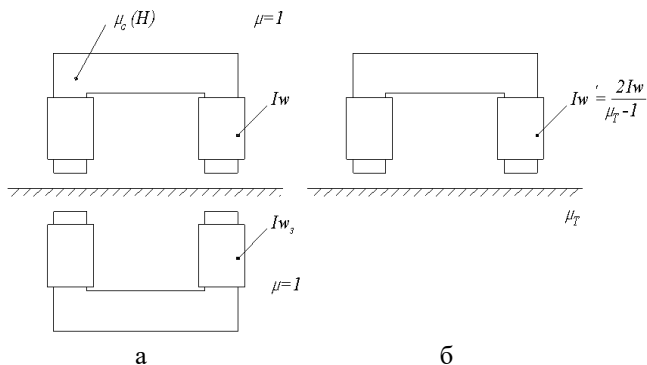


Рис. 2. К расчету поля методом зеркальных изображений: а - к расчету поля в верхней полуплоскости; б - к расчету поля внутри ферромагнитного материала

В качестве эскизного расчета магнитного поля внутри ферромагнитной детали предлагается методика, основанная на принципе зеркальных изображений рис.2. и рис. 3.

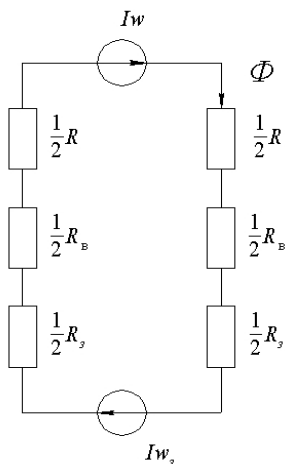


Рис.3. Упрощенная схема эквивалентной цепи

### Решение задачи

Сначала рассчитывается магнитный поток и намагниченность в сердечнике магнитопровода ЛНУ. При этом используется модель зеркально-

го изображения магнитной системы, показанные на рис. 2а и ее эквивалентная схема рис. 3.

Согласно методу Сирла [3] ток в обмотке зеркального изображения равен:

$$I_{\zeta} = \frac{I \times (\mu_c(\dot{I}) - 1)}{\mu_c(\dot{I}) + 1}, \quad (1)$$

здесь  $\mu_c(M)$  – зависимость относительной магнитной проницаемости от намагниченности

Намагниченность сердечника ЛНУ можно определить по формуле:

$$\dot{I} = \frac{\hat{O} \cdot [\mu_{\tilde{n}}(\dot{I}) - 1]}{\mu_0 \cdot S \cdot \mu_c}, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток в сердечнике.

Магнитный поток рассчитывается по формуле

$$\hat{O} = \frac{w \cdot (I + I_{\zeta})}{R + R_{\zeta} + R_{\hat{a}}}, \quad (3)$$

здесь  $w$  - число витков в обмотке;

$R$  - магнитное сопротивление сердечника;

$R_{\zeta}$  - магнитное сопротивление зеркального изображения сердечника.

Учитывая, что:

$$R = R_{\zeta} = \frac{2l}{\mu_0 \cdot \mu_c(H) \cdot S}, \quad R_{\hat{a}} = \frac{2l_{\hat{a}}}{\mu_0 \cdot S}, \quad (4)$$

где  $l$  - длина средней линии сердечника;

$l_{\hat{a}}$  - длина воздушного зазора.

На основании формул (1), (2), (3), (4) получается:

$$\dot{I} = \frac{w \cdot I \cdot [\mu_c(\dot{I}) - 1]}{[\mu_{\tilde{n}}(\dot{I}) + 1] \cdot [l + \mu_c(\dot{I}) \cdot l_{\hat{a}}]}. \quad (5)$$

Расчет  $M$  производится итерационным методом с использованием аналитической зависимости  $\mu_c(M)$  приведенной в [4].

После расчета намагниченности сердечника ЛНУ рассчитывается напряженность и намагниченность магнитного поля в области ферромагнитного материала детали. При этом полагается, что согласно методу Сирла напряженность магнитного поля рассчитывается как поле создаваемое обмоткой с током и поверхностным током с поверхностной плотностью равной намагниченности.

Катушки магнитной системы разбиваются на слои и магнитное поле катушки аппроксимируется при сохранении достаточной точности полем бесконечно тонких токовых слоев. Число слоев определяется по формуле:

$$m \geq \frac{\Delta l_k}{0.025 \cdot (P_1 + P_2)}, \quad (6)$$

где  $P_1, P_2$  - периметры сердечника и катушки;

$\Delta l_k$  - толщина намотки катушки.

Для рассмотренной системы  $P_1 = 4 \cdot (a + c)$ ;  $P_2 = 4 \cdot (a_k + c_k)$ , поэтому можно переписать

$$m \geq \frac{\Delta l_k}{0.1 \cdot (a + c + a_k + c_k)}. \quad (7)$$

В этом случае напряженность магнитного поля рассчитывается согласно следующей формуле:

$$\bar{I} = \sum_{i=1}^m \delta_i \cdot \bar{\alpha}_i(Q) + \delta_\mu \cdot \bar{\alpha}_\mu(Q), \quad (8)$$

где  $\delta_i$  - линейная плотность ампер-витков в бесконечно тонкой обмотке, которая рассчитывается по формуле:

$$\delta_i = \frac{I \cdot w}{m \cdot b_k \cdot (\mu_0 - 1)}.$$

Относительная магнитная проницаемость материала изделия считается величиной постоянной и равной максимальной проницаемости мате-

риала. Это допускается потому, что насыщается тонкий поверхностный слой материала между полюсами, а основной магнитный поток замыкается по ненасыщенному материалу. Величина  $\delta_\mu$  является плотностью поверхностного тока сердечника равного:

$$\delta_\mu = \frac{2I}{\mu\dot{O} - 1}. \quad (9)$$

Функции  $\alpha_i(Q)$  и  $\delta_\mu(Q)$  рассчитывается по формуле Био-Савара:

$$\overline{\alpha_i(Q)} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_k} \frac{d\vec{l} \times \overline{r_{PQ}}}{r_{PQ}^3} ds; \quad (10)$$

$$\overline{\alpha_\mu(Q)} = \frac{1}{4\pi} \int_{S_\delta} \frac{d\vec{l} \times \overline{r_{RQ}}}{r_{RQ}^3} ds; \quad (11)$$

здесь  $P, R, Q$  - точки источника наблюдения;

$S_k, S_\delta$  - поверхность бесконечно тонкого токового слоя катушки и сердечника.

После определения напряженности магнитного поля в материале контролируемой детали рассчитывается магнитный поток по формуле:

$$\dot{O} = \int_{S_{\dot{a}}} \mu_0 \cdot \mu\dot{O} \cdot \overline{I} \cdot d\vec{s}, \quad (12)$$

здесь  $S_{\dot{a}}$  - площадь сечения контролируемой детали в центре магнитной системы.

### **Вывод**

По отношению магнитного потока в центре магнитной системы, рассчитанного по формуле (12) к магнитному потоку в сердечнике ЛНУ можно оценить эффективность его магнитной системы и произвести оптимизацию ее параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фридман Л.А. Магнитное поле в нейтральной плоскости массивного стального изделия при намагничивании двухполюсным приставным электромагнитом / Л.А. Фридман, В.П. Табачник, Г.С. Чернова // Дефектоскопия, 1980 №4. - С. 64 – 73.
2. Куликов В.П. Расчет намагничивающих устройств для магнитографической дефектоскопии / В.П. Куликов, А.М. Берегов, А.П. Гарышев // Дефектоскопия, 1989, №2. - С. 3 – 11.
3. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники Т.3 / К.М. Поливанов. – М: Энергия, 1972. - 296 с.
4. Мильгу А.М. Формулы для описания нелинейных гистерезисных свойств ферромагнетиков / А.М. Мильгу // Дефектоскопия, 1987, №8. - С. 3 – 9.

***Tarassenko O.V., Ivgenko A.A., Kreselyuk Y.V. The calculation of the magnetic flux in a massive ferromagnetic parts as the local magnetization.***

*The article presents some of the results of theoretical research U - shaped magnetic system local magnetizing device. The problem of calculation of the magnetic field inside the ferromagnetic parts in order to assess the effectiveness of the magnetic system and make optimization of its parameters. Fig. 2 ist. 4.*

**Keywords:** local magnetizing apparatus, a magnetic system, a magnetic flux.

Тарасенко О.В. – канд. техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск

Ивженко А.А. – инженер Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск

Креселюк Ю.В. – аспирант Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск

Гедрович А.И., Каленская А.В., Гальцов И.А.

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ПЛАКИРОВАННОЙ СТАЛИ С КОМПЛЕКСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА МЕТАЛЛ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

Gedrovich A.I., Kalenskaya A.V., Galzow I.A.

### AUTOMATIC WELDING OF PLATED STEEL WITH A COMPLEX EFFECT ON THE METAL OF THE WELD POOL

Выявлено, что использование комплексного способа дуговой сварки позволяет, увеличить площадь поперечного сечения сварного валика тем самым уменьшить количество проходов при формировании соединения, без увеличения погонной энергии сварки, обеспечивает качественную, аустенитно-ферритную структуру сварных валиков переходного и плакирующего слоя.

**Ключевые слова:** плакированная сталь, макрохолодильник, вибрация, аустенит, феррит, сварочный флюс, бункер-питатель, сварочная проволока, сварочный валик, керамический ролик, коэффициент наплавки.

#### Введение

В комбинированных слоистых конструкциях, предназначенных для работы в агрессивных средах или при высоких температурах, соединение отдельных частей целесообразно производить с помощью сварки, так как механическое соединение часто оказывается конструктивно сложным и ненадежным в эксплуатации. Однако при этом приходится сваривать стали, отличающиеся одна от другой своими физико-химическими свойствами, в результате чего получить качественное и надежно работающее в особых условиях сварное соединение довольно трудно.

Сварка биметалла или плакированной стали предопределяет получение соединения разнородных сталей. Поэтому сварка высоколегированных сталей со средне- или низколегированными составила самостоятельную проблему, являющуюся одной из наиболее сложных проблем современной сварочной науки и техники, над решением которой длительное время работают многие исследователи, как в России, так и за рубежом.

Наиболее часто в корпусных сварных металлоконструкциях применяют плакированную сталь ферритоперлитного+аустенитного классов типа 09Г2С+08Х18Н10Т. Но при сварке плавлением переходных слоев от ферритоперлитной к аустенитной стали возникает проблема соединения



разнородных материалов, отличающихся физико-механическими свойствами и химическим составом.

**Целью работы** является - разработка оптимальной, комплексной технологии сварки переходного и плакирующего слоя, плакированной стали 09Г2С+08Х18Н10Т (30+5мм), с применением внутренних стоков тепла и низкочастотных колебаний.

#### **Методика исследований**

Двухслойная сталь 09Г2С+08Х18Н10Т состоит из сталей разных структурных классов, обладающих различными физико-механическими свойствами и неодинаковой свариваемостью.

Эффект разбавления, при сварке переходного и плакирующего слоя, вызывает ряд проблем, которые приводят к необходимости установления критериев выбора сварочных материалов, способов сварки и последовательности действий. В связи с этим при сварке следует учитывать особенности каждого слоя металла, а также переходной зоны между ними.

Основные особенности сварки двухслойной стали можно представить следующим образом (рис. 1).

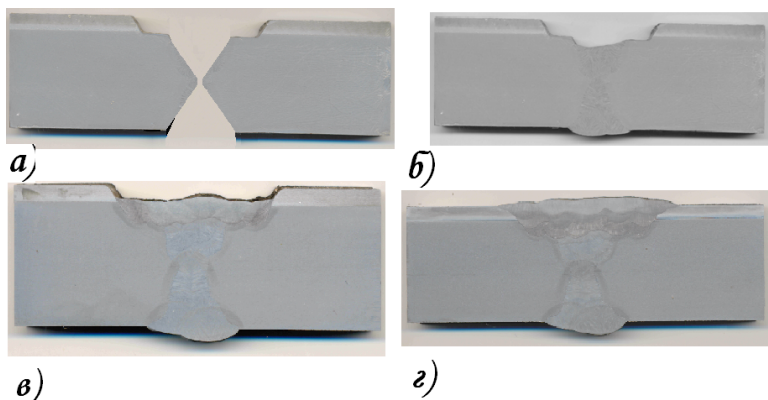


Рис. 1. Основные этапы получения сварного соединения плакированной стали: а - разделка под сварку, тип С-37, ГОСТ 16098 – 80; б – сварка основного слоя; в – сварка переходного слоя; г – сварка плакирующего слоя

В месте контакта разнолегированных металлов развивается химическая и структурная неоднородность. Кроме того, сварка как технологический процесс получения неразъемного соединения характеризуется высоколокальным введением тепловой энергии в металл.

Известно, что на образование сварного соединения тратится только четверть от общей теплоты дуги, а большая его часть расходуется на пе-

регрев сварочной ванны, нагрев изделия, его деформацию, диффузию химических элементов между слоями, что приводит к ухудшению свойств сварного соединения плакированной стали. Поэтому находят способы более эффективного использования теплоты для повышения как производительности сварки, так и качества сварных соединений.

### **Результаты исследований**

С целью повышения качества сварного шва переходного слоя плакированной стали ферритоперлитного + аустенитного классов возможно применение электродов и проволок с повышенным содержанием легирующих элементов, в частности никеля, компенсирующих разбавление аустенитного металла шва ферритным металлом и обладающим блокирующим действием реактивной диффузии углерода из стали менее легированной в более легированную. Данная технология сварки наиболее распространена в сварочном производстве, но она же является и наиболее дорогостоящей, с точки зрения применения никеля.

Так же возможно применение сварки с регулируемым термическим циклом. К ним относятся такие технологические способы регулирования структуры и свойств, как использование дополнительного гранулированного присадочного металла (ДГПМ), электромагнитное перемешивание (ЭМП) металла в сварочной ванне, ввод дополнительных электродов без тока в сварочную ванну, дозирование мощности, сужение сварочного зазора (УЗ), модулирование сварочного тока (МТ), принудительное и сопутствующее охлаждение (ПСО) в процессе сварки [1].

Но применяя способ (ЭМП) интенсивному электромагнитному перемешиванию ванны препятствует наличие шунтирования магнитного поля перлитной сталью, а также нарушение шлаковой защиты. В этом процессе весьма эффективен ввод внутренних стоков тепла в виде охлаждающей присадки (макрохолодильников), также снижающей температуру ванны.

Попадая в сварочную ванну макрохолодильники, либо частично оплавляются или полностью расплавляются, но не тотчас после попадания в расплав, а много позже, когда основной объем металла уже затвердел. Он сперва ведет себя, как подобает внутреннему кристаллизатору, снимает перегрев, является центром зарождения множества кристаллов, растущих от него точно так же, как растут кристаллы от края сварочной ванны. А затем, по мере прогревания, когда вокруг них уже все затвердело макрохолодильники, расплавляются и затвердевают вновь лишь в тот момент, когда температура сварочной ванны снизится до температуры начала их кристаллизации [3].

Но при введении охлаждающей присадки в жидкий металл сварочной ванны, наряду с позитивным влиянием на металлургию шва возникает проблема образования завышения геометрических характеристик вали-

ка. Решение данной проблемы состоит в применении низкочастотной поперечной вибрации сварочной проволоки.

Низкочастотные колебания, улучшают перемешивание аустенитно-ферритного шва, равномерно распределяют вводимый макрохолодильник в объеме металла сварочной ванны, уменьшают проплавление основного металла.

При колебаниях сварочной дуги столбчатые зерна металла шва изменяют свою ориентацию. Это происходит потому, что столбчатые зерна растут перпендикулярно фронту кристаллизации сварочной ванны, а при колебаниях дуги сварочная ванна тоже совершает колебания. Изменение ориентации столбчатых зерен резко уменьшает вероятность образования кристаллизационных трещин.

Для процесса автоматической сварки под слоем флюса с макрохолодильником был разработан флюс, содержащий в своей сердцевине металлический сердечник такого же химического состава что и материал проволоки, диаметр соответствовал условию  $D_{\text{макр}} \leq 0,5 d_{\text{эл}}$ , длиной  $L_m = 1,5 \text{ мм}$  (рис. 2). Оболочка соответствовала флюсу 48ОФ-6М.

Массовая доля макрохолодильника в формировании сварного валика составляла 40÷50% от наплавленной массы электродной проволоки.

Генерацию поперечных колебаний сварочной проволоки

( $\omega = 4 \div 5 \text{ Гц}$ ,  $A = 2 \text{ мм}$ ) производили с помощью контакта проволоки с шестигранным керамическим роликом (рис. 3).

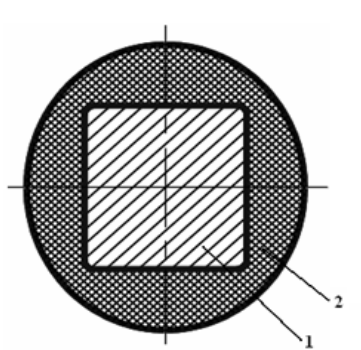


Рис. 2. Схема частицы флюса, с сердечником-макрохолодильником: 1- макрохолодильник; 2-оболочка плавненного флюса

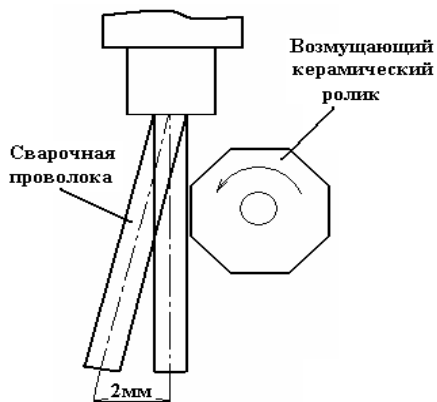


Рис. 3. Генерация вибрационных колебаний сварочной проволоки керамическим роликом

В процессе сварки сварочная проволока, выходя из горелки контактирует с шестигранным керамическим роликом, в результате возникающей силы трения (проволока-ролик) ролик вращается, с помощью граней отклоняет проволоку. Диаметр шестигранного керамического ролика подобран так, что колебания соответствовали режиму  $\omega = 4 \div 5$  Гц,  $A = 2$  мм.

В процессе сварки флюс плавится, ядро макрохолодильника имея большую плотность попадает в жидкий металл сварочной ванны, оболочка флюса всплывает на поверхность жидкого металла [2].

Скорость охлаждения жидкого металла сварочной ванны увеличивается в 1,8 раза, с  $W_{425-800}^{\text{охл}} = 10^0$  C/c (при обычном способе сварки) до  $W_{425-800}^{\text{охл}} = 18^0$  C/c (при сварке с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны).

Режимы автоматической сварки под слоем флюса переходного и плакирующего слоя с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны приведены в табл. 1.

Применение комплексного способа при автоматической сварке под слоем флюса позволяет на 67%, увеличить площадь поперечного сечения сварного валика (с  $F_{\text{ш}} = 45 \text{ мм}^2$  до  $F_{\text{ш}} = 67 \text{ мм}^2$ ), (рис. 4) тем самым уменьшить количество наложения сварочных валиков с 5 до 4, при сварке переходного слоя и с 12 до 9 при сварке плакирующего слоя (рис. 5 а, б), без увеличения погонной энергии сварки [4].

Таблица 1

**Режимы автоматической сварки под слоем флюса переходного и плакирующего слоя стали 09Г2С+08Х18Н10Т с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны**

АФк+ М <sub>макр</sub> =40÷50% + ω = 4÷5 Гц, А= 2 мм (постоянный ток, обратной полярности)					
Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, см/мин	Погонная энергия, кДж/см	Межваликовая температура, °С
4,0	440-460	27-29	50-54	12,4	23

Использование макрохолодильников в сварочных материалах АФк позволило исключить использование более дорогой проволоки Св-07Х25Н12Г2Т при сварке переходного слоя с заменой их на проволоку Св-08Х20Н9Г7Т, обеспечивая аустенитно-ферритную структуру сварных валиков. Содержание в структуре составило δ- феррита до 10%, магнитной фазы- 18%.

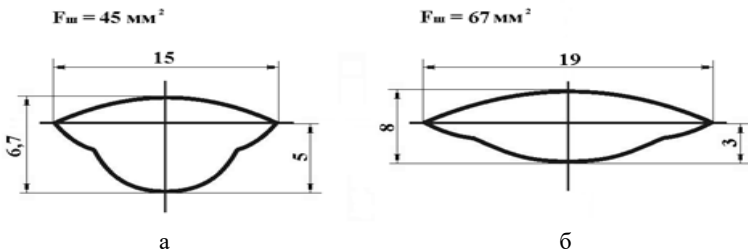


Рис. 4. Изменение геометрических параметров при автоматической сварке под слоем флюса (АФ): а- АФ обычным способом; б- АФк с макрохолодильником (М<sub>макр</sub>=40÷50%) и вибрацией электрода (ω=4÷5 Гц, А=2мм)

Характеристики процесса АФ сварки: проволока- Св-07Х25Н12Г2Т (переходной слой), Св- 08Х20Н9Г7Т (плакирующий слой), коэффициент наплавки - 14÷16 г/А·ч.

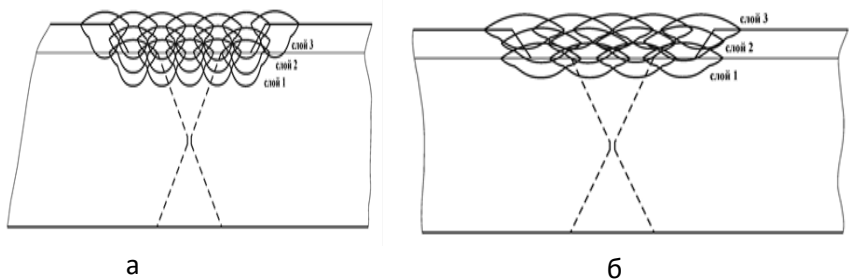


Рис. 5. Схема раскладки валиков сварки переходного (слой 1) и плакирующего (слой 2 и слой 3) слоев при автоматической сварке под слоем флюса (АФ): а- АФ обычным способом ( $n_b=17$ ); б- АФк с макрохолодильником ( $M_{\text{макр}}=40\div 50\%$ ) и вибрацией электрода ( $\omega=4\div 5$  Гц,  $A=2$ мм) ( $n_b=13$ )

Характеристики процесса АФк с макрохолодильником ( $M_{\text{макр}}=40\div 50\%$ ) и вибрацией электродной проволоки

( $\omega = 4\div 5$  Гц,  $A= 2$  мм): проволока- Св-08Х20Н9Г7Т (переходной и плакирующий слой), макрохолодильник Св-08Х20Н9Г7Т рубленый, во флюсе, коэффициент наплавки – 22,5 г/А·ч.

### Выводы

1. На образование сварного соединения тратится только четверть от общей теплоты дуги, а большая его часть расходуется на перегрев сварочной ванны, нагрев изделия, его деформацию, диффузию химических элементов между слоями, что приводит к ухудшению свойств сварного соединения плакированной стали.

2. При выполнении многопроходных сварных соединений, эффективен ввод в металл сварочной ванны, охлаждающей присадки (макрохолодильника), позволяющего рационально использовать температуру паразитного тепла сварочной дуги.

3. Применение комплексного способа при автоматической сварке под слоем флюса позволяет на 67%, увеличить площадь поперечного сечения сварного валика (с  $F_{\text{ш}}=45\text{мм}^2$  до  $F_{\text{ш}}=67\text{мм}^2$ ), тем самым уменьшить количество наложения сварочных валиков с 5 до 4, при сварке переходного слоя и с 12 до 9 при сварке плакирующего слоя, без увеличения погонной энергии сварки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Патон Б. Е. Многослойная сталь в сварных конструкциях / Б.Е. Патон – К.: Техника, 1984. – 284с.

2. Пат. України №45027 В23К35/362. Флюс для електродугового зварювання сталей / Гальцов І.О., Гедрович А.І., Каленская А.В., Васильєв С.А. Заявл. 7.05.2009, опубл. 26.10.2009., Бюл. №24.
3. Гудцов Н.Т. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справ. Изд. / Н.Т. Гудцов, М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштадт – М.: Металлургия, 1956. – 468 с.
4. Гальцов И.А. Изменение геометрии сварного шва при введении в сварочную ванну внутренних стоков тепла и низкочастотных колебаний / И.А. Гальцов, А.В. Каленская, А.И. Гедрович // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля, 2010, - №3 (145), - Частина 2, Луганськ, 2010. - С. 72-77.

***Galzow I.A., Kalenskaya A.V., Gedrovich A.I. Automatic welding of plated steel with a complex effect on the metal of the weld pool.***

*It was found that the use of the integrated method of arc welding allows to increase the cross-sectional area of the weld bead thus reduce the number of passes in the formation of compounds, without increasing the heat input welding power, provides high-quality, austenitic-ferritic structure welded transition rollers and the cladding layer.*

***Keywords:*** *plated steel, macrofridge, vibration, austenite, ferrite, welding flux, hopper-feeder, welding wire, welding roller, ceramic roller, deposition rate*

Гальцов И. А. – канд. техн. наук, доцент Луганского национального аграрного университета  
e-mail: galzow.igor@yandex.ua

Каленская А. В. – инженер Луганского государственного университета им. В. Даля  
e-mail: calenskaya.anna@yandex.ua

Гедрович А.И. – д-р техн. наук, профессор Луганского государственного университета им. В. Даля

Бояршина Л.А.

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА КАЧЕСТВО ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПРИ ВОССТАНОЛЕНИИ КОЛЁСНЫХ ПАР

Boiarchina L.A.

### INFLUENCE OF STRUCTURAL TRANSFORMATIONS ON THE QUALITY OF ARC WELDING WHEN RESTORING WHEELSETS

Проанализированы проблемы технологии электрической дуговой наплавки при восстановлении колесных пар, связанные со структурными превращениями при охлаждении.

**Ключевые слова:** колесная пара, восстановление, электрическое дуговая наплавка, трещины, предварительный подогрев, структурные преобразования.

#### Введение

К конструктивным узлам подвижного состава высокой ответственности относятся колёсные пары, в которых наиболее изнашиваемыми элементами являются гребни и поверхность катания. Выход из строя колёсной пары влечёт за собой отказ в эксплуатации целого вагона или локомотива, вызывает увеличение времени их простоя в нерабочем парке.

В настоящее время нет чёткого представления о причинах внезапного обострения бокового износа колёс подвижного состава и рельсов. Называется до 50 причин, которые в сумме привели к эффекту взрывного повышения изнашивания гребней колёс, их боковых поверхностей и рельсов. Это прежде всего такие необратимые изменения на железных дорогах, как:

- уменьшение стандарта ширины колеи с 1524 мм на 1520 мм;
- увеличение протяжённости термоупрочнённых рельсов в сети дорог на 50%, а рельсов первой группы качества, имеющих повышенную твёрдость, более, чем в 2 раза;
- изменение профиля головки рельса, предусматривающего одноточечный контакт на профиль, обеспечивающий наличие двухточечного контакта профиля катания колеса с головкой рельса.

Стандартами устанавливается средний срок службы колёс в пределах 12 лет, однако фактически срок их службы существенно меньше. Учитывая, что в настоящее время колёсная пара интенсивно эксплуатируемого



рабочего парка вагонов обтачивается не менее одного раза в год и что при ремонте колёс по гребню методом механической обработки в стружку уходит 12-5 мм толщины обода с каждого колеса, средний срок службы колёс составляет порядка 3-4 лет.

По мере обточки толщина бандажа уменьшается, и наименьшая его толщина при выпуске из текущего ремонта допускается 43 мм и не менее 50 мм для тепловозов, работающих со скоростями свыше 120 км/ч. Такого рода ограничения по использованию при ремонте колёсных пар обточек инициируют изыскание и разработку альтернативных технологий восстановления изношенных в процессе эксплуатации колёс [1].

В настоящее время высокоэффективным методом увеличения ресурса колёсных пар является наплавка их гребней [2]. Это позволяет свести к минимуму обточку колёс, сохранить упрочнённый слой металла на поверхности катания и достигнуть срока службы, определяемого только интенсивностью износа по кругу катания и образованием контактно-усталостных дефектов.

Однако реализация технологии наплавки имеет определённые трудности, которые объясняются свойствами колёсной стали. Среднеуглеродистая сталь вагонных колёс, содержащая 0,55-0,65% углерода, является трудносвариваемой сталью, склонной при сварке и наплавке к образованию горячих трещин в наплавленном металле и холодных трещин в околошовной зоне (ОШЗ). Кроме того, при воздействии концентрированного источника энергии в процессе наплавки возникает сложное распределение температур и связанное с ним поле напряжений и упруго-пластических деформаций, в значительной мере определяющих работоспособность наплавленных колёс.

Современная теория процессов сварки трактует механизм образования холодных трещин двумя гипотезами: закалочной и водородной. Холодные трещины возникают при сочетании трёх факторов:

- образование в ОШЗ мартенсита;
- действие высоких временных и остаточных напряжений;
- наличие в шве и ОШЗ диффузионного водорода.

На предотвращение образования холодных трещин направлены следующие технологические приёмы:

- проковка сварочных флюсов при температуре 35...400 °С в течение 1...2 ч и хранение в сушильных шкафах при температуре не ниже 60 °С, что обеспечивает снижение количества водорода в зоне сварки;

- предварительный подогрев до 250 °С и устранение сквозняков в зоне наплавки гребня, что предотвращает образование мартенсита и снижает уровень остаточных напряжений;

- использование при наплавке постоянного тока обратной полярности, что уменьшает растворимость водорода в жидком наплавленном металле;

- медленное охлаждение колёсной пары после наплавки (в теплоизоляционной камере в течение 6 часов до температуры не более 75 °С).

Анализ современных методов наплавки гребней колёсных пар показал, что наибольшее применение получили одно- и двухдуговой способы электрической дуговой наплавки.

Для однодуговой наплавки рекомендуется использовать сварочную проволоку Св-08ХГ2СМФ диаметром 3 мм и сварочные флюсы марок АН-348А, АН-60, АНЦ-1. Параметры режима наплавки представлены в табл. 1 [3].

Таблица 1

**Параметры режима однодуговой наплавки**

Параметр	Значение параметра
Диаметр электродной проволоки, мм	3
Сварочный ток	280...330
Напряжение на дуге, В	30...32
Скорость наплавки, м/ч	20...25
Вылет электрода, мм	35...40
Угол наклона электрода от вертикали, град	15...20
Смещение дуги от зенита навстречу направлению вращения, мм	35...45

Колёса с толщиной обода не менее 30 мм и толщиной гребня не менее 20 мм подлежат восстановлению двухдуговой наплавкой (табл. 2), при которой требуемое количество наплавленного металла обеспечивается путём контроля скорости остывания металла, исключая образование мартенсита в металле шва и ОШЗ. Перед наплавкой производится подогрев обода (например, пропановым пламенем) до температуры 180 °С. Охлаждение колёсной пары после наплавки осуществляется за 5...6 часов до температуры 50 °С в специальном термосе с опорой на ось.

Изучение нормативных материалов [3] показало, что поскольку износ ободьев – величина не постоянная, то целый ряд параметров технологического процесса восстановления наплавкой требуют уточнения. Это прежде всего такие параметры:

- температура подогрева и её распределение;
- допустимое время от окончания подогрева до начала наплавки;
- допустимые пределы изменения температуры подогрева в процессе многопроходной наплавки;
- изменение структурного состава при наплавке в ОШЗ и влияние на структурообразование степени износа колеса [4,5].

**Параметры режима двухдуговой наплавки**

Параметр	Значение параметра первой дуги	Значение параметра второй дуги
Скорость подачи проволоки, м/ч	60	70
Диаметр электродной проволоки, мм	3	3
Сварочный ток, А	220...230	250...260
Напряжение на дуге, В	25	28
Скорость наплавки, м/ч	20...22	20...22
Вылет электрода, мм	30...35	35...38
Угол наклона электрода от вертикали перпендикулярно направлению наплавки, град	15...20	20...25
Смещение дуги по направлению вращения, мм	0	5...10
Расстояние между дугами, мм	65	65
Смещение второй дуги относительно первой, мм	0	2

**Целью работы** является исследование влияния структурных превращений на качество наплавки при восстановлении колесных пар подвижного состава.

**Методика и результаты исследования**

Важнейшим фактором, обеспечивающим необходимый уровень качества при восстановлении наплавкой, являются тепловые процессы, определяющие ход и результат структурных превращений.

Механические, технологические и служебные свойства сталей и сварных соединений определяются структурой, которая является гетерофазной системой. Воздействие концентрированных источников теплоты связано с нагревом и охлаждением металла, которые предопределяют особенности протекания структурно-фазовых превращений, наличие градиента температур и напряжений. Для целенаправленного воздействия на структуру необходимо знать закономерности её образования.

В зоне термического воздействия в процессе нагрева и охлаждения при сварке или наплавке, а также в шве при охлаждении получают развитие целый ряд фазовых и структурных превращений.

Особенностью фазовых и структурных превращений при воздействии сварочных источников тепла является то, что они протекают в неравновесных условиях сварочного термомодеформационного цикла, т.е. в условиях быстрого нагрева и охлаждения, и одновременного развития напряжений и деформаций. Характер превращений зависит от состава сплава, максимальных температур нагрева, а их завершённость – от скоростных и деформационных параметров.

Основной процесс в сталях при охлаждении, окончательно определяющий микроструктуру и свойства металла сварных соединений, связан с превращением аустенита.

В зависимости от состава стали, сварочного термического цикла, скорости охлаждения в диапазоне температур 800...700 °С в околошовной зоне и в шве при охлаждении возможны следующие переходы аустенита: в феррито-перлит, мартенсит и бейнит.

Ферритное превращение, представляющее собой превращение диффузионного типа, характерно при относительно малых скоростях охлаждения. Содержание углерода в нём не превышает 0,02%. Твёрдость феррита составляет HB 80...100 кг/мм<sup>2</sup>.

Мартенситное превращение происходит при высоких скоростях охлаждения. Тип мартенсита (пластинчатый или пакетный) определяет его механические и технологические свойства. Пластинчатый мартенсит в околошовной зоне более склонен к образованию холодных трещин, чем пакетный.

Бейнитное превращение, называемое также промежуточным, сочетает элементы перлитного и мартенситного превращений. Ему предшествует диффузионное перераспределение углерода в аустените, в результате которого образуются участки, обеднённые и обогащённые углеродом.

При непрерывном охлаждении в условиях сварки ни один из видов превращений не успевает завершиться полностью, а по мере снижения температуры виды превращений сменяют друг друга.

Воздействие концентрированных источников теплоты в процессе многослойной наплавки характеризуется непостоянством во времени параметров тепловложения, что может приводить к повторным нагревам и охлаждениям отдельных областей ОШЗ в процессе всего цикла восстановления. Это является причиной активно протекающих в этих зонах процессов отпуска и самоотпуска. Сформировавшиеся на этапе охлаждения мартенситная и бейнитная структуры, а также остаточный аустенит в процессе повторных нагревов могут переходить в феррито-цементитные смеси различной степени дисперсности, что существенно влияет на теплофизические и механические параметры системы и определяет качество получаемых результатов. По данным работы [5] установлены следующие температурные интервалы структурных превращений (табл. 3).

**Интервалы температур и виды превращений при отпуске**

Интервал температур	Вид превращения
260-380 °С	Аустенит → бейнит
200-380 °С	Мартенсит → троостит
260-380 °С	Бейнит → троостит
380-550 °С	Троостит → сорбит
600-700 °С	Сорбит → перлит

Отличительной особенностью процессов структурообразования при отпуске является существенное влияние времени пребывания структуры в соответствующем температурном интервале. Например, степень дисперсности феррито-цементитной смеси зависит не только от температуры нагрева при отпуске, но и от времени пребывания материала при данной температуре.

Уточнённая оценка теплового и структурного состояния системы в каждый момент времени возможна путём решения тепловых задач в нестационарной постановке.

### **Выводы**

1. Даны технологические рекомендации для проведения технологического процесса восстановления изношенных колёсных пар одно- и двухдуговой наплавкой.
2. Регулирование процессом структурообразования при наплавке обеспечивает возможность предупреждения образования холодных трещин, как недопустимого дефекта.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Бояршина Л.А. К вопросу о выборе метода восстановления колёсных пар подвижного состава. // Вісн. Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля. – 2010. - № 5. – С. 38-41.
2. Бояршина Л.А. Анализ технологий восстановления колёсных пар электрической дуговой наплавкой. // Вісн. Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля. – 2011. - № 4. – С. 115-118.
3. Унифицированная технологическая инструкция по автоматической наплавке под флюсом гребней вагонных колёсных пар / МПС; ВНИИЖТ. – Инв. № 5-02-98У. – М., 1998 – 32 с.
4. Неклюдов А.Н. Оценка кинетики тепловых процессов и структурообразования при восстановлении наплавкой колёс вагонов с разной степенью их изношенности: автореф. дис. ...к.т.н.: М.: - 2004. – 16 с.
5. Павлов Н.В. Наплавка гребней вагонных колёсных пар / Н.В. Павлов, И.Д. Козубенко, Н.Е. Вызова [и др.]. // Железнодорожный транспорт. – 1993. - №7. – С. 37-40.

***Boiarchina L.A. Influence of structural transformations on the quality of arc welding when restoring wheelsets.***

*In the article, some problems of the technology of electric arc deposit welding in the process of the restoration of worn-out wheel pairs, which are related to structural transformation during cooldown, have been analyzed.*

***Key words:*** *wheel pair, restoration, electric arc deposit welding, flaws, pre-heating, structural transformation*

Бояршина Л.А. – канд. техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: oomdis@yandex.ru

Коваленко А.А., Чубарова И.А.

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ЗОЛОТНИК ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

Kovalenko A.A., Chubarova I.A.

### NON-STATIONARY HYDROMECHANICAL FORCE ACTING ON THE SPOOL OF ELECTROHYDRAULIC DRIVE

Рассмотрен учет нестационарной гидромеханической силы, действующей на золотник ЭГУ, за счет улучшения эффективности работы применяемых гидравлических приводов и систем путем повышения эффективности гидроаппаратов.

**Ключевые слова:** электрогидравлический привод, металлургическое производство, электрогидравлический усилитель (ЭГУ), математическое моделирование, нестационарная гидродинамическая сила.

#### Введение

В экономике развитых стран в современных условиях важнейшее место занимает черная металлургия, в том числе отрасль металлопереработки.

Повысить качество продукции возможно лишь за счет улучшения эффективности работы применяемых следящих гидравлических приводов и систем, а это достижимо путем повышения эффективности, входящих в его состав гидроаппаратов и их элементов.

Наиболее полно отвечают современным требованиям электрогидравлические следящие приводы, которыми следует оснащать основные машины и агрегаты металлургических производств.

Важнейшим элементом следящих гидроприводов является электрогидравлический усилитель (ЭГУ), связывающий управляющую систему приводов и силовую систему. В настоящее время электрогидравлические усилители различных типов и конструкций широко применяются также в составе авиационных, станочных, робототехнических и др. автоматических следящих системах управления.

При моделировании современных электрогидравлических систем, которые представляют собой сложные технические системы с элементами различной природы (механические, электрические, гидравлические и др.) используются модели в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений. Математическое моделирование позволяет сократить финан-

совые и временные затраты к минимуму и при этом дает результаты очень близкие к экспериментальным.

**Целью работы** является усовершенствования математической модели характеристик электрогидравлического усилителя (ЭГУ) путем учета в ней влияния гидродинамических сил.

### Постановка задачи

Одним из путей усовершенствования математической модели характеристик ЭГУ является учет в ней влияния гидродинамических сил. Сведения по вопросам определения величины гидродинамической силы и влияния конструктивных параметров, содержащиеся в современной литературе, недостаточны, особенно нестационарной гидродинамической силы. Поэтому основная задача приведенной ниже работы является определение нестационарной гидродинамической силы, действующая на золотник в переходном режиме.

На золотник, кроме статической гидродинамической силы, действует со стороны жидкости добавочная сила, которая возникает при изменении скорости потока, и эта составляющая при определенных условиях может привести к неустойчивой работе распределителя и возникновению автоколебаний.

В общем случае нестационарная гидродинамическая сила определяется следующим образом. Выделим в потоке жидкости произвольный объем (рис. 1). Предположим, что поток жидкости может проходить через выделенную поверхность в любой точке.

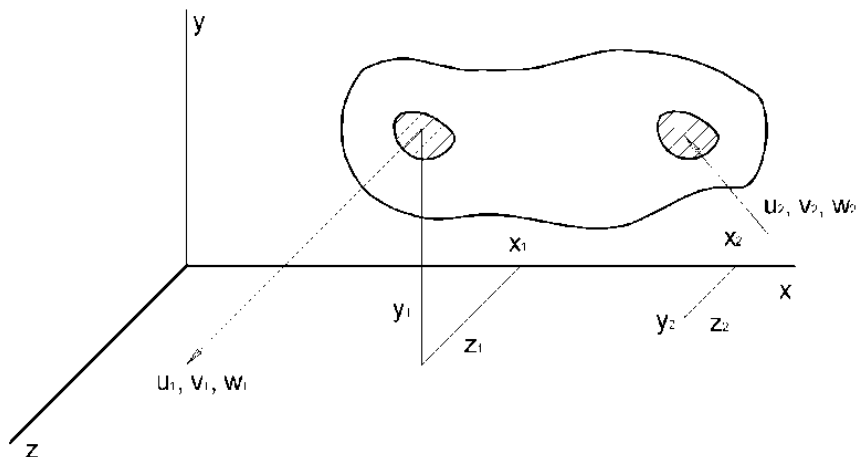


Рис. 1. К расчету нестационарной гидродинамической силы  
Будем считать поток положительным, если он вытекает из объема. В



произвольный момент времени количество движения жидкости в выделенном объеме:

$$M = \rho \int \bar{q} dV \quad (1)$$

где  $dV$  – элемент объема;

$\bar{q}$  – мгновенная скорость.

Проекции на оси величины  $\bar{M}$  будут:

$$\begin{aligned} M_x &= \rho \int_V u dV; \\ M_y &= \rho \int_V v dV; \\ M_z &= \rho \int_V w dV; \end{aligned} \quad (2)$$

здесь  $u, v, w$  – проекции скорости  $\bar{q}$  на оси координат.

Интегрирование по объему уравнений (1) и (2) может быть заменено интегрированием по поверхности с использованием формулы Грина. Пусть  $dS$  – элемент поверхности выделенного объема, направление наружу перпендикулярное поверхности обозначим  $\mathbf{n}$ .  $\alpha, \beta, \gamma$  – углы между осями координат и вектором  $\mathbf{n}$ , а  $q_n$  – нормальная составляющая скорости жидкости в сечении  $dS$ .

Согласно теоремы Грина

$$\begin{aligned} \int_S x q_n dS &= \int_S x (u \cos \alpha + v \cos \beta + w \cos \gamma) dS = \\ &= \int_V \left[ \frac{\delta}{\delta x} (xu) + \frac{\delta}{\delta y} (xv) + \frac{\delta}{\delta z} (xw) \right] dV = \int_V \left[ \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} \right] x dV + \int_V u dV. \end{aligned} \quad (3)$$

Если жидкость несжимаема и внутри выделенного объема отсутствуют источники и стоки, то уравнение неразрывности будет иметь вид:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} = 0$$

и последний член уравнения (3) также будет равен нулю, поэтому

$$\begin{aligned} M_x &= \rho \int_V u dV = \rho \int_S x q dS = \rho \int_S x dQ; \\ M_y &= \rho \int_S y dQ; \\ M_z &= \rho \int_S z dQ; \end{aligned} \quad (4)$$

Теперь рассмотрим тот же объем жидкости, но с непроницаемыми стенками, за исключением  $N$  малых отверстий, через которые может протекать жидкость. Предположим, что отверстия достаточно малы и скорости жидкости в каждом из них можно считать одинаковыми и параллельными. Тогда

$$\int_S x dQ = \sum x_k Q_k \quad (5)$$

где  $x_k$  – это  $x$ -координата  $k$ -го отверстия;

$Q_k$  – общий расход через это отверстие.

Уравнение (5) теперь преобразуется

$$\begin{aligned} M_x &= \rho \sum_{k=1}^N x_k Q_k; \\ M_y &= \rho \sum_{k=1}^N y_k Q_k; \\ M_z &= \rho \sum_{k=1}^N z_k Q_k; \end{aligned} \quad (6)$$

Зная общее количество движения жидкости внутри объема (рис. 1),

можно подсчитать результирующую силу, действующую на жидкость со стороны стенок. Три проекции этой силы будут

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{\delta M_x}{\delta t} = \rho \sum_{k=1}^N Q_k \frac{\delta x_k}{\delta t} + \rho \sum_{k=1}^N x_k \frac{\delta Q_k}{\delta t}; \\
 F_y &= \frac{\delta M_y}{\delta t} = \rho \sum_{k=1}^N Q_k \frac{\delta y_k}{\delta t} + \rho \sum_{k=1}^N y_k \frac{\delta Q_k}{\delta t}; \\
 F_z &= \frac{\delta M_z}{\delta t} = \rho \sum_{k=1}^N Q_k \frac{\delta z_k}{\delta t} + \rho \sum_{k=1}^N z_k \frac{\delta Q_k}{\delta t}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

В этих уравнениях  $\delta x_k / \delta t = u_k$  – проекция скорости жидкости на ось X в k-ом отверстии,  $\delta y_k / \delta t = v_k$ ,  $\delta z_k / \delta t = w_k$ . Поэтому:

$$\begin{aligned}
 F_x &= \rho \sum_{k=1}^N Q_k u_k + \rho \sum_{k=1}^N x_k \frac{\delta Q_k}{\delta t}; \\
 F_y &= \rho \sum_{k=1}^N Q_k v_k + \rho \sum_{k=1}^N y_k \frac{\delta Q_k}{\delta t}; \\
 F_z &= \rho \sum_{k=1}^N Q_k w_k + \rho \sum_{k=1}^N z_k \frac{\delta Q_k}{\delta t}.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Для стационарного потока  $\delta Q_k / \delta t = 0$ , второй член в правой части уравнений (8) исчезает, и уравнения соответствуют известным уравнениям стационарного потока.

В рассматриваемом случае модели распределителя объем имеет только два отверстия (рис. 1) и уравнения могут быть упрощены. Обозначим индексом 1 параметры для первого сечения отвода и 2 – для подвода. Тогда

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= Q = -Q_2, \\
 F_x &= \rho Q(u_1 - u_2) + \rho(x_1 - x_2) \frac{dQ}{dt},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

Если  $F'$  сила воздействия жидкости на ограничивающие стенки, то

$$\begin{aligned} F'_x &= -F_x = \rho Q(u_2 - u_1) + \rho(x_2 - x_1) \frac{dQ}{dt}; \\ F'_y &= \rho Q(v_2 - v_1) + \rho(y_2 - y_1) \frac{dQ}{dt}; \\ F'_z &= \rho Q(w_2 - w_1) + \rho(z_2 - z_1) \frac{dQ}{dt}. \end{aligned} \quad (10)$$

где  $dQ$  – общий расход через поверхность  $dS$ .

Единственное допущение при использовании теоремы Грина в данном случае заключается в требовании к непрерывности  $u$ ,  $v$  и  $w$  и их производных.

Полученные выражения могут быть применены к случаю течения жидкости в распределителе (рис. 2). Если золотник цилиндрический и щель занимает всю окружность или отверстия расположены равномерно, то  $F'_y$  и  $F'_z$  равны нулю.

$$F' = \rho Q(u_2 - u_1) + \rho(x_2 - x_1) \frac{dQ}{dt}, \quad (11)$$

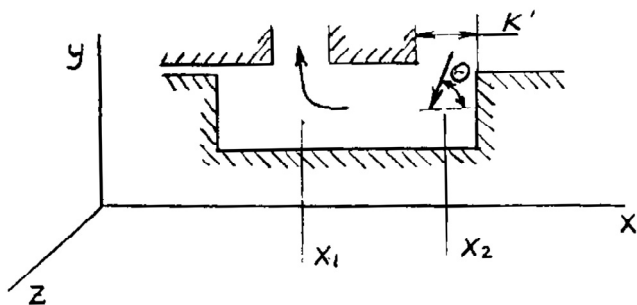


Рис. 2. Демпфирующая длина камеры

Используя уже упомянутое допущение  $u_2 \gg u_1$ , получим:

$$F' = \rho Q u_2 + \rho(x_2 - x_1) \frac{dQ}{dt}. \quad (12)$$

Если перепад давлений на щели постоянен и равен  $\Delta p$ , то

$$u_2 = \varphi_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \cos \theta, \quad (13)$$

$$Q = \mu_0 w x' \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (14)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \mu_0 w \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \frac{dx'}{dt}, \quad (15)$$

где  $\varphi_0$  и  $\mu_0$  соответственно коэффициенты скорости и расхода щели. Таким образом, система уравнений (13 -14) применима для любого потока, если в нем отсутствуют источники и стоки.

$$F'_x = -[2\varphi_0 \mu_0 (\cos \theta) w \Delta p] x' + [\mu_0 w \sqrt{2\Delta p \rho L}] \frac{dx'}{dt} \quad (16)$$

или

$$F'_x = -k_1 x' - k_2 \frac{dx'}{dt}, \quad (17)$$

где

$$L = x_2 - x_1, \quad (18)$$

$$k_1 = 2\varphi_0 \mu_0 (\cos \theta) w \Delta p. \quad (19)$$

$$k_2 = \mu_0 w \sqrt{2\Delta p \rho L}. \quad (20)$$

Из уравнения (17) видно, что сила, действующая на золотник при нестационарном потоке, является суммой двух сил. Первая составляющая подобна усилию линейной пружины, которая стремится закрыть золотник. Это статическая гидродинамическая сила, рассмотренная выше. Вторая составляющая представляет собой демпфирующую силу с коэффициентом демпфирования  $k_2$ .

Отметим, что только два геометрических размера влияют на коэффициент демпфирования, это – длина щели  $W$  и осевой размер камеры  $L$  между входным и выходным отверстиями. Форма самой камеры роли не играет.

Если принять направление движения потока, изображенное на рис. 2, то  $L = X_2 - X_1$  является положительной величиной, а коэффициент демпфирования – отрицательной. Качественно  $L$  можно назвать демпфирующей длиной золотника, количественно таких длин может быть несколько для многолинейных распределителей.

Величина и знак коэффициента  $k_2$  очень важны. Если  $k_2$  – отрицательный и больший по величине, чем положительное демпфирование, вызванное другими отверстиями и вязким трением жидкости в зазоре между золотником и корпусом (рис. 2), золотник может быть динамически нестабильным, что вызовет появление в гидравлической системе автоколебаний.

Демпфирующую длину определить достаточно трудно, так как неизвестно расположение центра истечения струи, вытекающей из распределителя. На практике можно рекомендовать в качестве этой величины принимать расстояние  $a - e$  между кромками золотника (рис. 2). Исходя из этого, демпфирующая длина распределителя при поступлении жидкости через щель будет всегда положительной, что приводит к отрицательному коэффициенту демпфирования и возможности возникновения автоколебаний в системе. Положительная демпфирующая длина может быть скомпенсирована в четырехлинейном распределителе отрицательной так, чтобы общий коэффициент демпфирования будет положительным, что приведет к устойчивой работе распределителя в переходных режимах.

## **Выводы**

Пробные расчеты, выполненные на разработанной математической модели, подтвердили ее непротиворечивость и пригодность для анализа и разработки путей совершенствования ЭГУ, с целью повышения эффективности электрогидравлического привода.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богун Ю.Б. Проблемы и перспективы реализации металлопродукции. / Ю.Б. Богун - К.: «Менеджер», – 2002,– №2. – С.18-23.
2. Лисовский А.В. Состояние и перспективы технического перевооружения металлургических предприятий. / А.В. Лисовский - К.: Сб. Теория и практика металлургии, - 1999. – 211 с.
3. Коваленко А.А. Гидравлика и гидропневмоприводы / А.А. Коваленко, В.И. Соколов, В.И. Ремень. // под ред. А.А. Коваленко. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2008. – 320 с.
4. Недопекин Ф.В. Основы механики сплошных сред / Ф.В. Недопекин, А.А. Коваленко, Я.А. Гусенцова - Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2010.- 277 с.
5. Deticek E. The Control of Electrohydraulic Linear Drive with an Observer. *Strojn. Vestn.* – №10-12, – 1992.
6. Коваленко А. А. Основы технической механики жидкостей и газов / А. А. Коваленко, В. И. Соколов. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 1998. – 272 с.

***Kovalenko A.A., Chubarova I.A. Non-stationary hydromechanical force acting on the spool of electrohydraulic drive.***

*The accounting of non-stationary hydromechanical force acting on the spool of electrohydraulic drive, applied to hydraulic drives and systems by increasing its efficiency were presented.*

**Keywords:** *electro-hydraulic drive, steel production, electro-hydraulic amplifier (ЕНА), mathematical modeling, non-stationary hydrodynamic force.*

Коваленко А.А. – профессор Луганского государственного университета им. В. Даля.

e-mail: azazello102@gmail.com

Чубарова И.А. – магистр Луганского государственного университета им. В. Даля

e-mail: ira33385@mail.ru

УДК 692.5 (691.328)

**Засько В.В.**

## **ПРИМЕНЕНИЕ МОНОЛИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОЛОВ**

**Zasko V. V.**

### **APPLICATION OF MONOLITHIC COVERINGS OF INDUSTRIAL FLOORS**

Выполнен анализ требований, предъявляемых к покрытиям промышленных полов. Рассмотрены композиционные материалы на основе бетонов, применяющиеся в конструкциях промышленных полов. Проанализированы причины дефекты монолитных полов, изготовленных на основе цементных растворов и бетонов. Показано, что перспективными строительными материалами являются дисперсно-армированные бетоны – сталефибробетоны.

**Ключевые слова:** монолитные промышленные полы, дефекты, дисперсное армирование, сталефибробетон, сухие смеси, промышленные отходы.

#### **Введение**

В современных производственных помещениях промышленных зданий вследствие большого разнообразия технологических процессов полы подвергаются механическим, тепловым, химическим и другим воздействиям. Механические воздействия складываются из движения людей, различных видов транспортных средств (тележек, электрокаров, автомобилей и др.), ударов при падении твердых предметов, сосредоточенных нагрузок от оборудования и материалов. Тепловые воздействия возникают от нагретого воздуха, жидкостей, горячих предметов, от теплового излучения нагретого оборудования. Химические воздействия связаны с минеральными маслами и эмульсиями, органическими растворителями, кислотами и щелочами [1]. Основным моментом выбора напольного покрытия в помещении производственного типа является определение его защитных функций и способа укладки.

**Целью работы** является выполнение анализа существующих требований к напольным покрытиям, а также анализ технологий изготовления строительных материалов для напольных покрытий промышленных зданий.



## Результаты исследований

Композиционные материалы на основе бетонов, применяющиеся в конструкциях промышленных полов, должны удовлетворять ряду требований [2, 3]. Это прежде всего потенциальные механические нагрузки, воздействующие на покрытие, которые зависят от технологического процесса, оборудования, передвигающегося транспорта. Термические нагрузки, возникающие в результате различных перепадов температур, например, непосредственная близость различных проемов, производственных печей, работающих в высокотемпературном режиме, промышленных холодильных установок. Пагубно на напольном покрытии отражается контакт с различными разогретыми жидкостями и предметами. Температурный коридор в таких условиях может колебаться от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+1200^{\circ}\text{C}$ . Требования к гигиеническим показателям промышленных полов, в соответствии с которыми они должны легко чиститься и обладать влагостойкостью. Долговечность покрытия в некоторых случаях должна достигать до сорока лет. Поверхность промышленных полов должна иметь гидроизоляцию. Должна сохраняться чистота напольного покрытия в течение времени. Влажность основания промышленного пола зависит от близости залегания грунтовых вод. Кроме перечисленного промышленные покрытия должны удовлетворять требованиям, предъявляемые к декоративному оформлению полов.

Обычно для устройства промышленных полов используют бетон марки В22,5. Он обладает надежностью, достаточной износостойкостью, невысокой стоимостью, просто и быстро укладывается, но его главный недостаток - пористость.

Несмотря на простоту устройства монолитных полов, изготовленных на основе цементных растворов и бетонов, при их эксплуатации могут появиться следующие дефекты [4].

Образование трещин: сквозных, поверхностных и волосяных. Сквозные трещины образуются в результате недостаточного предела прочности бетона или раствора при растяжении. Поверхностные трещины образуются в результате температурно-усадочных деформаций, а волосяные - в основном при усадке цементных бетонов и растворов.

Шелушение поверхности монолитного покрытия, которое происходит в результате недостаточной адгезии цементного камня с заполнителем. В результате шелушения поверхностного слоя уменьшается толщина покрытия пола, образуются раковины, выбоины, сколы поверхности и, как следствие, снижается несущая способность покрытия в целом.

Отколы углов и краев плит образуются в результате недостаточной прочности цементных бетона и раствора, либо неправильного или недостаточного армирования конструкции в этой зоне.

Коробление плиты пола возникает при усадке в результате твердения бетона из-за разности структуры бетона по сечению плиты и скорости потери влаги.

Повышенное пылеотделение как следствие низкой износоустойчивости бетонных и цементных покрытий.

Повысить сопротивляемость цементных бетонов и растворов растягивающим усилиям, уменьшить деформацию усадки, а, соответственно, трещинообразование монолитного покрытия, а также значительно увеличить стойкость к вибрационным и ударным воздействиям способно объемное армирование волокнами-фибрами [5, 6]. В отличие от сосредоточенного армирования стержнями, сетками и каркасами фибровое армирование улучшает структуру цементных бетонов и растворов по всему объему композита на макро-, микроуровнях. В отличие от сосредоточенного армирования стержнями, сетками и каркасами фибровое армирование улучшает структуру цементных бетонов и растворов по всему объему композита на макро-, микроуровнях.

Дисперсное армирование бетонов и растворов волокнами-фибрами известно уже более 100 лет. В начале XX века русский инженер путей сообщения В.П. Некрасов провел исследования и изготовил опытные конструкции из сталефибробетона [5, 6].

Фибробетон - это бетон, армированный дисперсными волокнами (фибрами). Такой бетон представляет собой обычную смесь цемента, песка, крупного заполнителя и воды, дополненную определённым количеством стальных или других волокон (фибр). Для улучшения обрабатываемости иногда добавляется пластифицирующая добавка.

Применение фибробетонных покрытий полов взамен традиционных бетонных и железобетонных обусловлено рядом преимуществ [7, 8]. Фибробетонные покрытия позволяют улучшить эксплуатационные характеристики монолитного покрытия в результате повышения трещиностойкости, ударной стойкости, вязкости разрушения, увеличения предела прочности на растяжение, снижения деформаций усадки и ползучести, снижения истираемости верхнего слоя. Технологические преимущества фибробетонных покрытий заключаются в снижении трудоемкости работ за счет частичной замены, а в ряде случаев полного исключения арматурных работ. Волокна вводятся на стадии приготовления смеси, т.е. процесс армирования механизирован и сводится к одностадийному. Преимущество экономического плана в снижении расхода материалов, так как требуемая толщина устраиваемого фибробетонного покрытия меньше в сравнении с традиционным. Кроме того, сокращаются сроки строительства.

В настоящее время наибольшая эффективность фибробетона как композита достигается при правильном подборе и сочетании компонен-

тов. Самым эффективным материалом в этом плане, ввиду его относительной стоимости, является стальная арматура.

Модуль упругости арматуры в 56 раз больше аналогичного показателя бетона, однако, при достаточной анкеровке в бетоне не может быть полностью использована прочность и получен наибольший вклад арматуры в работу самого материала как до, так и после образования трещин.

При использовании стальной фибры в бетоне отсутствует проблема с анкерровкой. В отличие от проволочной сетки или арматуры, которая устанавливается в одной плоскости, стальная фибра диспергирует по всей бетонной матрице.

Стальная фибра выполняет множество функций в зависимости от пропорций, которые могут варьировать в пределах 15-120 кг/м<sup>3</sup> [8].

Одна из первоначальных функций - уменьшение микро- и макротрещин. Определяя трещины на начальной стадии их появления, стальная фибра препятствует их распространению.

Традиционная классическая арматура, или проволочная сетка, предназначена для того, чтобы предохранить бетон от образования самых первых усадочных трещин, а не предотвратить их распространение.

Реконструкция монолитных промышленных полов может осуществляться следующими способами [9, 10]:

- классическим устройством цементно-бетонных полов с армированием арматурными сетками;
- полной или частичной заменой конструкции пола дисперсно армированными цементно-бетонными смесями;
- полной или частичной заменой конструкции пола дисперсно армированными цементно-бетонными смесями и армированием стержневой арматурой;
- упрочнением верхнего слоя бетона сухими смесями (топпинг).

Топпинг полов обеспечивает основанию повышенное сопротивление к механическим и другим повреждениям. Это достигается за счет состава смеси (цемент, минеральные пигменты, красители и наполнители). Для бетонных полов, подверженных значительным механическим нагрузкам, применяются нержавеющие металлические наполнители.

Дисперсное армирование промышленных полов в зависимости от степени интенсивности эксплуатационных нагрузок может осуществляться стальной фиброй; полимерной (полипропиленовой) жесткой или волнистой фиброй; полимерной (полипропиленовой) мягкой – волокнистой фиброй; смесью стальной и полипропиленовой фиброй.

Применяемые для ремонта промышленных полов смеси в основном импортного производства: польской фирмы ATLAS (POSTAR 10, POSTAR 40, POSTAR 100 и т.д.), так и самовыравнивающиеся цементные и ангидритно-гипсовые смеси для пола (SAM 30, SAM 100, SAM 150, SAM 200); немецкой фирмы «Knauf». (КНАУФ FE 30, FE 50 Largo, FE 80

Allergo, FE 25 A tempo, FE Fortissimo); немецкой фирмы «Henkel» ТМ Cerecit (CF-56, CN-76).

Все эти материалы имеют высокую рыночную стоимость, что значительно уменьшает объемы их использования из-за низкой платежеспособности предприятий-заказчиков реконструкции.

Современная промышленность выпускает десятки тысяч наименований разнообразной продукции. В производство вовлекается во много раз больше исходного сырья, чем выпускается готовых продуктов. Например, на выпуск 1 т чугуна расходуется 1,5 - 2 т сырья, соответственно: алюминия - 3 - 10 т, никеля - 5 - 10 т, извести - 1,5 - 2 т, цемента - 1,4 - 1,7 т. При этом на разных стадиях технологического процесса возникают отходы. Из отраслей, потребляющих промышленные отходы, наиболее емкой является промышленность строительных материалов, доля сырья которой в себестоимости продукции достигает 50 % и более.

Разработка строительных материалов на основе комплексного использования таких материалов обусловлена эколого-экономическими факторами: во-первых, значительным ростом цен на цемент, природные заполнители, энергоносители и, во-вторых, ухудшением экологической ситуации в результате образования и накопления промышленных отходов. Исследования показывают, что широкое применение промышленных отходов позволило бы на 15 - 20 % расширить минерально-сырьевую базу промышленности.

В работах [11, 12] в качестве заполнителей в бетоне применялся карбид кремния и металлическая дробь как отходы производства трубного завода. Авторы изучали влияние содержания отходов карбида кремния и металлической дроби на механические свойства. При этом исследовали разные составы карбида кремния и отходов металлической дроби (табл.1, 2).

Таблица 1

**Результаты химического анализа отходов производств**

Наименование материала	Определяемый компонент, %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FejOj	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Черепок абразивного инструмента зерна - 46,2%, связки - 53,8 %	28,7	15,7	0,58	0,74	0,06	0,51	0,32	0,59
Шламы механической обработки деталей связующее - 5,3 %, металлическая стружка - 96 %	-	-	98,7	-	-	-	-	-
Бой бетонных строительных конструкций	39,1	1,8	0,90	16,7	3,8	-	-	-
Шламы абразивного производства (зерно 40-80%)	14,5	2,8	1,5	0,9	1,2	-	-	-
Пемза (переработка)	88,9	2,1	1,0	0,07	0,12	0,06	-	-
Продукт механической обработки инструмента	3,8	89,6	0,4	0,3	0,35	-	0,50	0,45
Стеклобой и отходы стекловолокна	23,8	60,8	1,7	1,9	2,1	-	3,2	2,8
	53,0	15,0	0,4	17,0	4,0	-	0,3	0,19

**Химический состав карбида кремния**

Наименование материала	Определяемый компонент, %							
	C	SiC	Fe,Q	Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Si+SiO <sub>2</sub>	NaCl*
Карбид кремния черный, фракция -0,05мм	0,07	94,9	0,64	3,17			4,11	
Спеки карбида кремния зеленого, фракция +1,0мм	15,6	37,8	0,40		1,58	0,59	35,3	7,45/ 0,22
Карбид кремния черный минусовые фракции	27,1	19,6	0,45	Менее 0,3	0,24	0,10	48,7	
Карбид кремния фракция - 800мкм		96,4	0,85					
Карбид кремния, циклонная пыль, фракция 0,04мм	0,20	92,1	1,4					

Применение предложенных авторами заполнителей позволило улучшить физико-механические свойства строительного материала (табл. 3).

Выполненные исследования показали наиболее благоприятное влияние введения в состав бетона наполнителя из материалов карбида кремния и металлической дроби на свойства бетона и позволили определить оптимальное их соотношение. Увеличение прочностных показателей бетона обусловлено совокупностью физико-механических и эксплуатационных свойств металлического наполнителя и связующего, также за счет плотной упаковки частиц при твердении.

В связи с выполняемыми исследованиями возникает проблема создания более экономичных цементно-бетонных составов для реконструкции

**Физико-механические свойства строительного композита различного состава**

Физико-механические показатели	состав № 1	состав №3	состав №6	Изменение физико-механических показателей
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,77	2,07	2,03	Увеличение на 11%
Пористость, %	21,4	13,7	14,3	Снижение на 47%
Предел прочности при сжатии, МПа	20,6	18,9	27,2	Увеличение на 27,6%
Водопоглощение, %	13,0	6,6	7,1	Снижение на 40%

и устройства монолитных промышленных полов на основе ресурсосберегающих технологий и применения вторичного сырья.

Интерес представляет разработка состава цементно-бетонной смеси, дисперсно-армированной отходами металлообработки, и разработка технологии изготовления строительного материала, обеспечивающих повышение конструкционных свойств монолитных полов

Разработка строительных материалов для промышленных полов на основе комплексного использования вторичного сырья обусловлена эколого-экономическими факторами. К ним относится значительный рост цен на цемент, на природные заполнители и энергоносители, а также ухудшение экологической ситуации в результате образования и накопления промышленных отходов. Широкое применение промышленных отходов позволило бы на 15-20% расширить минерально-сырьевую базу промышленности строительных материалов.

### **Вывод**

Представлены требования к покрытиям промышленных полов. Изучены строительные материалы на основе бетона, применяемые для покрытий. Установлено, что наиболее успешным является применение для покрытий дисперсно-армированных бетонов. В условиях региона возможно применение промышленных отходов металлообрабатывающих цехов, что позволит получить достаточно высокие физико-механические и технологические свойства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов О.М. Полы промышленных зданий / под ред. О.М. Иванова. – М.: Стройиздат, 1971. – 124 с.
2. СП Полы. Технические требования и правила проектирования, устройства, приемки, эксплуатации и ремонта.
3. СНиП 2.03.13-88 Полы. Нормы проектирования.
4. Баженов Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.
5. Войлоков И.А. Промышленные покрытия полов, проблемы и их решение на рубеже веков / И.А. Войлоков // Стройпрофиль. – 2008. - № 2 (64). – с. 108-110.
6. Горб А.М. О дефектах бетонных полов на объектах складского назначения, причинах их возникновения и способах предупреждения / А.М. Горб // Складская недвижимость. – 2009. - № 4. – с. 4-8.
7. Горб А.М. Применение композитов на основе дисперсно армированных бетонов при устройстве полов в зданиях производственно-складского назначения / А.М. Горб, И.А. Войлоков // Мир строительства и недвижимости. – 2009. - № 33. – с. 27-33.
8. Горб А.М. Техничко-экономическое обоснование применения сталефибробетона в конструкциях промышленных полов / А.М. Горб, А.И. Войлоков // Склад и техника. – 2009. - № 10. – с. 62-66.
9. Пономаренко В.Д. Современные технологии для идеального пола / В.Д. Пономаренко // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. - № 7. – С. 66-68.
10. Попов К.Н. Современные материалы для устройства полов / К.Н. Попов, М.Б. Кадро // Строительные материалы. – 2000. - №3. – С. 2-5.
11. Барабашщикова Т.К. Оптимизация состава бетона с использованием заполнителей на основе отходов предприятий Волгоградской области / Т.К. Барабашщикова [и др.]. // Изд. Орловского гос. техн. ун-та. Серия Строительство Транспорт - 2007 - № 3/15 (531). - С. 119-123.
12. Барабанщикова Т.К. Исследование возможности использования вторичного сырья в составе строительных композитов / Т. К. Барабанщикова [и др.] // Социально-экон. и технология проблемы развития строит, комплекса и жилищно-коммунального хозяйства региона. Материалы Всерос. науч. – практич. конф. (ноябрь 2006 г) - Волгоград, 2006. - С 87-90.

### ***Zasko V. V. Application of monolithic coverings of industrial floors.***

*The analysis of requirements imposed to coverings of industrial floors is made. The composite materials on the basis of concrete which are applied in designs of industrial floors are considered. The reasons defects of the monolithic floors made on the basis of cement mortars and concrete are analysed. It is shown that perspective construction materials are the disperse reinforced concrete - stalefibrobetona.*

**Keywords:** *monolithic industrial floors, defects, disperse reinforcing, stalefibrobeton, dry mixes, industrial wastes.*

Засько В.В. – инженер-строитель Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: zasko@yandex.ru



Рябичева Л.А., Сороканич С.В.

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ СУЛЬФАТНОЙ КОРРОЗИИ ПРИ ВЛАГОПЕРЕНОСЕ

Ryabicheva L.A., Sorokanich S.V.

### ANALYTICAL MODEL OF THE PROCESSES OF SULFATE CORROSION OF CONCRETE UNDER MOISTURE TRANSFER

Накоплен значительный объем экспериментальных исследований в области коррозии бетона. Его практическое использование для практических нужд и дальнейших экспериментальных исследований связано с установлением основных закономерностей процессов, представленных в виде физико-математических моделей. Применение моделей позволяет успешно решать вопросы мониторинга бетонных и железобетонных конструкций и сооружений, прогнозирования их долговечности и т. д.

**Ключевые слова:** коррозия бетона, массоперенос, модель, капилляр, поровое пространство, накопление продуктов.

#### Введение

Анализ наиболее широко используемых моделей показал, что практически все они основываются на известной задаче

Стефана, в которых исследуемый процесс рассматривается как одномерный [2]. В работе [6] показано, что приведение к такой расчетной схеме связано с перемещением равномерно распределенных в матрице частиц, вступающих в реакцию с раствором агрессивного вещества, к оси капилляра. В действительности как показано в работах [3,4,5] вокруг каждого капилляра образуется расширяющаяся цилиндрическая граница нейтрализации, поскольку к каждому капилляру вдоль продольной оси примыкают ориентированные в поперечном направлении.

Ранее были разработаны математические модели процессов сульфатной коррозии бетона для случая конвективно-диффузионного массопереноса при учете одномерного стационарного линейно изменяющегося по высоте содержания влаги, то же – двумерного массопереноса [3,7].

Вместе с тем, первая модель имеет определенный недостаток, связанный с ее значительной сложностью. В данной работе выполнено существенное упрощение постановки задачи путем введения уместных упрощений, позволяющих получить аналитическое решение. В частности, из экспериментальных данных следует, что накопление продуктов реакций

коррозии в твердой фазе происходит в тонком слое у поверхности испарения. Поэтому можно принять скорость массопереноса в указанном слое для каждого интервала времени постоянной, зависящей от степени заполнения порового пространства бетона продуктами коррозии.

Химические реакции протекающие в процессе коррозии представлены в работе [1,7].

**Целью работы** является построение аналитической модели процессов сульфатной коррозии при конвективно-диффузионном влагопереносе, учитывающей образование вокруг капилляров подвижной границы химического превращения.

### Постановка задачи

Анализ экспериментальных данных показал, что накопление продуктов коррозии (гипса, этtringита, таумасита) происходит в поверхностном слое относительно малой толщины (для большинства конструкций). Поэтому в указанном слое величину объемного влагосодержания можно принять постоянной. Величина пористости корректируется с учетом накапливаемых продуктов коррозии в твердой фазе.

Принимается, как и ранее, что структура порового пространства соответствует изотропной капиллярно-пористой среде. Для описания структуры порового пространства бетона выделяется структурный элемент, представляющий собой цилиндр с изолированными гранями радиуса  $R_0$ , в центре которого располагается сквозной капилляр радиуса  $r_0$ , к которому в радиальном направлении примыкают капилляры с суммарной пористостью  $\varepsilon_r$  [5]. Таким образом, общая капиллярная пористость равна  $\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_r$ ; где  $\varepsilon_n$ - пористость в продольном и  $\varepsilon_r$ - пористость в радиальном направлениях:  $\varepsilon_n = \frac{1}{3}\varepsilon$  и  $\varepsilon_r = \frac{2}{3}\varepsilon$ ;  $\varepsilon_n = \frac{r_0^2}{R_0^2}$ .

### Результаты исследований

В качестве исходной принимается подтвержденная экспериментально принципиальная схема развития фронта коррозии подвижной границы химического превращения в радиальном направлении.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - V_0 \frac{\partial c}{\partial x} - q(x, t); \quad (1)$$

$$q(t) = \frac{R M_0 \mu}{R_0 t + r_0^2}; \quad R = \frac{2 D c \varepsilon_r}{\mu M_0}$$

где  $\mu$ - стехиометрический коэффициент;

$m_0$  - концентрация вступающего в реакцию вещества цементной матрицы;

$C$  - концентрация  $Na_2SO_4$ ;

$V_0$  - скорость конвективного массопереноса;

$q(x,t)$  - функция стока, характеризующая скорость связывания  $Na_2SO_4$  в результате химической реакции вокруг капилляров [4,5].

$$t=0 \quad C=0; \quad (2)$$

$$x=0 \quad C=C_0; \quad (3)$$

$$x=e \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

Принимаем, что верхняя граница является непроницаемой для солей  
Объем накапливаемых солей  $m$  в твердой фазе равен:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \beta_{кр} (C_1 - C_1^0); \quad (5)$$

где,  $\beta_{кр}$  - скорость процессов кристаллизации;

$C_n$  - концентрация насыщения;

$C_1$  - кристаллизирующийся продукт коррозии.

В величине  $q(x,t)$  значение  $C(x,t)$  заменяется линеаризованным значением  $\bar{C}$  - являющимся постоянным для каждого из интервалов по длине  $x$  и по времени. Алгоритм численного расчета на основе аналитического решения приведен в работе [6].

Производим замену:

$$C = C_0 + u(x, t); \quad (6)$$

Тогда:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - V_0 \frac{\partial u}{\partial x} - q(t); \quad (7)$$

$$t=0 \quad u(x, 0) = -C_0; \quad (8)$$

$$x=0 \quad u(0, t) = 0; \quad (9)$$

$$x=e \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0; \quad (10)$$

Производим еще одну замену:

$$u = \omega \cdot e^{\alpha x - \beta t}; \quad (11)$$

где  $\alpha = \frac{V_0}{2D}$ ;  $\beta = \frac{V_0^2}{4D}$ ;

С учетом (11) уравнение (7) приводится к виду:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - V_0 \frac{\partial \omega}{\partial x} - f(t); \quad (12)$$

$$t=0 \quad \omega = -C_0 e^{\alpha x}; \quad (13)$$

$$x=0 \quad \omega=0; \quad (14)$$

$$x=c \quad \frac{\partial \omega}{\partial x} + h\omega = 0; \quad h = \frac{V_0}{2D}; \quad (15)$$

$$f(t) = q(t) e^{-(\alpha x - \beta t)}; \quad (16)$$

Решение (12-15) ищем в виде:

$$\omega(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \omega_n(t) X_n(x); \quad n=1,2,3,\dots; \quad (17)$$

Из граничных условий (14-15) следует:

$$X_n(x) = \sin \lambda_n x; \quad (18)$$

где  $\lambda_n$  определяется из условия:

$$tg \lambda_n c = -\frac{\lambda_n}{h}; \quad (19)$$

Для определения функции воспользуемся условием (13) предварительно разложив по собственным функциям;

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \theta_n(t) X_n(x); \quad (20)$$

$$\text{где } \theta_n(t) = \frac{2\lambda_n}{\lambda_n c - 2 \sin 2\lambda_n c} \int_0^c q(t) e^{-\alpha x + \beta t} \sin \lambda_n x dx;$$

$$\theta_n(t) = \psi_n q(t) e^{\beta t}; \quad \psi_n = \frac{2\lambda_n c e^{-\alpha c} [\lambda_n \sin \mu_n - \alpha c \cos \mu_n + \alpha c e^{\alpha c}]}{(2\lambda_n - \sin 2\lambda_n c) (\alpha^2 c^2 - \lambda_n^2)},$$

Используя (17) и (20) и предполагая равномерную сходимость получающихся производных рядов получаем:

$$\sum_{n=1}^{\infty} [\omega_n^1(t) + D \lambda_n^2 \omega_n(t)] = -\theta_n(t) X_n(x) = 0; \quad (21)$$

$$0 < x \leq \vartheta; \quad 0 < t < \infty;$$

Откуда следует:

$$\omega_n^1(t) = -D \lambda_n^2 \omega_n(t) - \theta_n(t); \quad (22)$$

$$t = 0 \quad \omega(0) = -C_0 e^{-\alpha x}; \quad (23)$$

$$-C_0 e^{-\alpha x} = \sum_{n=1}^{\infty} a_n X_n(x); \quad (24)$$

Раскладывая в ряд (23) получаем:

$$a_n = -[e^{-\alpha \vartheta} [\alpha \sin \lambda_n \vartheta - \lambda_n \cos \lambda_n \vartheta] + \lambda_n] \frac{2C_0}{\varepsilon(\alpha^2 + \lambda_n^2)}; \quad (25)$$

Решая дифференциальное уравнение (22) с учетом начального условия (24) и (25) получаем:

$$\omega_n(t) = \int_0^t \psi_n \frac{R m_0 \mu}{R \tau + r_0} e^{-z \lambda_n^2 (t-\tau)} e^{\beta \tau} d\tau - a_n e^{-D \lambda_n^2 t}; \quad (26)$$

После интегрирования получаем:

$$\omega_n(t) = -\exp(D \lambda_n^2 t) + \left\{ \begin{aligned} & \psi_n \frac{m_0 \mu}{D \lambda_n^2 + \beta} \exp \left[ (-D \lambda_n^2 + \beta) \left( t + \frac{r_0^2}{R} \right) \right] \times \\ & \times \left[ E_i \left( \frac{D \lambda_n^2 + \beta^2}{R} \right) (R t + r_0^2) - E_i \left( \frac{D \lambda_n^2 + \beta}{R} \right) r_0^2 \right] \end{aligned} \right\}; \quad (27)$$

Здесь  $E_i(z)$ - интегральная показательная функция. Для малых значений  $z$  справедливо представление  $E_i(z) \approx \gamma \ln z$ , где  $\gamma$ - постоянная Эйлера.

Тогда:

$$\begin{aligned} C(x, t) = & \sum_{n=1}^{\infty} [-a_n \exp(-D \lambda_n^2 t)] + \ln \left( \frac{R t}{r_0^2} + 1 \right) \cdot e^{-\alpha(t-x)} \times \\ & \times \sum_{n=1}^{\infty} K_n \exp \left[ (-D \lambda_n^2 + 2\beta) t - (D \lambda_n^2 + \beta) \frac{r_0^2}{R} \right] \sin \lambda_n x \end{aligned} \quad (28)$$

где  $K_n = \frac{m_0 \beta \mu}{D \lambda_n^2 + \beta^2}$ .

Отметим, что в полученной зависимости (28) члены, зависящие от координаты  $x$ , характеризующей распределение концентраций вдоль структурного элемента, а логарифмическая функция определяет положение нейтральной границы нейтрализации в радиальном направлении. Отметим, что в отличие от ранее полученного решения общего вида в данном случае в явной форме получена зависимость для определения подвижной границы, в точности совпадающая с аналитическими решениями других задач. Указанное вполне очевидно поскольку во всех случаях принята одинаковая принципиальная структурная схема процесса коррозии. Достоинство полученного аналитического решения заключается в простоте анализа и возможности получения относительно простой формы на основе экспериментальных данных полумэмпирической модели для инженерных расчетов

Полученное решение имеет одно ограничение, которое в аналитической форме может быть представлено в виде:

$$q(x, t) \leq \eta V_0 \frac{\partial C}{\partial x}; \quad (29)$$

где  $\eta$  - степень заполнения пор влагой на участке, прилегающем к поверхности испарения.

Физически указанное означает, что плотность потока вещества в радиальном направлении должна быть меньше, чем плотность потока в продольном направлении. Например, при условии образования в капиллярах монослоя относительной влажностью  $\varphi \approx 0,4$  процесс полностью прекращается. При  $\varphi > 0,5$  процесс согласуется с полученным решением [3,5].

Отметим еще одну важную особенность процесса коррозии. Величина массопереноса  $V_0$  зависит от величины текущей капиллярной пористости. Поэтому для каждого временного интервала она уточняется, т. е. принимается, что  $V = f(\alpha)$ . Справедливость логарифмической зависимости доказана на основе обработки экспериментальных данных [6].

## Выводы

Построена аналитическая модель процессов сульфатной коррозии при конвективно-диффузионном влагопереносе, учитывающая образование вокруг капилляров подвижной границы химического превращения.

Модель в явном виде позволяет количественно оценить степень нейтрализации бетона и процесс накопления продуктов коррозии. Количеству вещества  $C$  (в данном случае  $Na_2SO_4$ ) соответствует  $\mu_1, c_1$  продук-

тов коррозии (гипс, этtringит – в зависимости от термодинамических условий).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры [и др.]. – М.: Стройиздат. 1990 – 316 с.
2. Рязанова В.А. Теоретические основы процессов сульфатной коррозии бетонных конструкций с испаряющей поверхностью / В.А. Рязанова // Збірник наукових праць ЛНАУ. Серія: Технічні науки. - Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2007-№71(94) – С. 197-207.
3. Файвусович А.С. Физико-математическое моделирование процессов коррозии III вида с учетом влагопереноса. / А.С. Файвусович, В.А. Рязанова, Г.Г. Бурцев [и др.] // Сб. Современные проблемы строительства. Донецк: ООО “Лебедь”, 2002. - С. 208-218.
4. Файвусович А.С. Влияние влагопереноса на кинетику процесса коррозии / А.С. Файвусович, В.А. Рязанова, Т.А. Хохленко // Сб. Будівельні конструкції. Сучасні проблеми бетону та його технологій. – Вип. 56. – К., 2002. – С. 424-431.
5. Файвусович А.С. Сульфатная коррозия бетона при наличии испаряющей поверхности / А.С. Файвусович, В.А. Рязанова, Т.А. Хохленко // Матеріали науково-практичної конференції „Захист від корозії та моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж”. 5-12 червня 2003 р. Донецьк: УАМК, 2003. - С.358-365.
6. Гусев Б.В. Построение математической теории процесса коррозии бетона / Б.В. Гусев, А.С. Файвусович // Строительные материалы. 2008 №3 - С. 38-41.
7. Рязанова В.А., Сороканич С.В. Коррозия бетона морских сооружений в зоне капиллярного подсоса / В.А. Рязанова, С.В. Сороканич // Зб. Удосконалення конструкції залізничної колії та системи ведення колійного господарства. Харків 2008. - С. 197-211.

### ***Ryabicheva L.A., Sorokanich S.V. Analytical model of the processes of sulfate corrosion of concrete under moisture transfer.***

*Currently abroad and in the CIS countries have accumulated a significant amount of experimental research in the field of corrosion of concrete. Its practical use for practical purposes and further experimental studies associated with the establishment of the basic regularities of processes, presented in the form of physico-mathematical models-lay. The use of models can successfully address issues of monitoring concrete and reinforced concrete structures and over-armed, prediction of their durability, etc.*

**Keywords:** *concrete corrosion, mass transfer, model, ka-his, pore space, a accumulation of products.*

Рябичева Л.А. – доктор. техн. наук, профессор Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: ryabic@gmail.com

Сороканич С.В. – инженер Луганского национального аграрного университета, г. Луганск  
e-mail: stas.sorokanich.82@mail.

Дьяковская О.С.

## **ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВО МНОГОПУСТОТНЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ**

Dyakovskaya O.S.

### **THE INTRODUCTION OF NEW TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF HOLLOW-CORE FLOOR SLABS**

Исследуется эффективная технология производства многопустотных плит перекрытия; приводится сравнительный анализ производства плит по агрегатно-поточной технологии и новой технологической линии «Тенсиланд».

**Ключевые слова:** плиты многопустотные, агрегатно-поточная технология, технологическая линия «Тенсиланд», железобетонные изделия.

#### **Введение**

В условиях рыночной экономики необходимо и целесообразно развитие и внедрение в практику производства железобетонных изделий новых технологий, которые позволят предприятиям производить современные высокотехнологичные изделия, соответствующие европейским стандартам качества, архитектуры и требованиям строительного рынка.

На сегодняшний день ранее существовавшие технологии производства железобетонных изделий не могут полностью удовлетворить спрос потребителей как качественно, так и количественно. Поэтому необходимо постоянно модернизировать производство, что позволяет автоматизировать и улучшать процесс изготовления продукции на всех стадиях жизненного цикла. Основными задачами, которые стоят перед производителями железобетонных изделий на ближайшее будущее, являются не только увеличение выпуска продукции, но и освоение новых технологий.

К новым технологиям можно отнести испанскую технологическую линию по производству многопустотных плит перекрытий «Тенсиланд». Линия сочетает в себе наилучшие технические характеристики выпускаемой продукции. По своей надежности, рентабельности и разнообразию ассортимента эта линия по праву считается европейским лидером в области производства многопустотных плит перекрытия, а также мелкоштучных вибропрессованных изделий.



**Целью работы** является исследование новой технологической линии «Тенсиланд» для внедрения в производство многопустотных плит перекрытия.

### **Методика и результаты исследования**

Для производства многопустотных плит перекрытия экструзионным способом применяется жесткие бетонные смеси класса С25/30, арматурная проволока Вр-II диаметром 5 мм. Изготавливаемые плиты отвечают техническим условиям ТУ У26.6.-01267308-002:2008 «Плиты пустотные непрерывного формования».

Производство «Тэнсиланд» представляет собой бетонный полигон с металлическим покрытием, разделенный на 8 формовочных дорожек, ограниченных рельсами для перемещения технологического оборудования.

Каждая формовочная дорожка служит поддоном для непрерывного формования плит и балочных железобетонных изделий. Рабочая длина дорожек 99 м. Под металлическим полотном дорожек размещены нагревательные элементы, предназначенные для подогрева поддона и передачи тепла к свежотформованному изделию, что ускоряет процесс набора прочности бетона. По торцам дорожек расположены упоры для крепления концов высокопрочной проволоки, применяемой для армирования железобетонных изделий. За упорами, расположенными в начале дорожек, установлены кассеты бухт проволоки, и находятся гидравлические устройства для натяжения проволоки. За упорами, расположенными в конце дорожек, имеется зона для выхода оборудования, его мойки и технического обслуживания. В этой зоне устроены канаты и отстойники для сбора отходов производства и очистки воды перед сбросом в канализацию. Подача бетона на линию осуществляется с бетоносмесительного узла через ленточный конвейер и раздаточную тележку. Готовая продукция транспортируется на склад на вывозной тележке [3].

Данная технология позволяет нарезать плиты практически на любой размер по длине (сегодня — до 10,8 метра, в перспективе — до 12), а также обеспечивает идеально гладкую потолочную поверхность у готовой плиты. Учитывая, что и кромки плит по этой технологии получаются очень ровные и гладкие, становится ясно, почему при подготовке таких плит к отделке значительно снижаются все затраты — и трудовые, и финансовые. А предварительно натянутая, причем одинаково по всей длине дорожки, высокопрочная арматура является залогом и правильной геометрии всех плит, и их большой прочности. Особенность плит еще и в том, что отсутствуют петли для их захвата при монтаже. С этой целью разработаны, прошли соответствующие испытания и уже активно используются специальные траверсы.

Плиты перекрытия марки ПБ изготавливаются экструзионным способом, а плиты ПК агрегатно-поточным способом. В ходе расчетов учтены все расходы на материалы необходимые для изготовления многопустотных плит перекрытий.

Учтены фактические цены (по городу) на: воду, электроэнергию, арматуру, бетон, заработную плату работников, плановое техническое обслуживание.

Сравнение показателей производства плит приведено в таблице 1.

Таблица 1

**Сравнительные показатели производства плит перекрытия**

Показатель	ПК 60-12-8	ПБ 60-12-8
Класс бетона	C12/15 (B15)	C25/30 (B30)
Объем бетона, м <sup>3</sup>	0,86	0,885
Расход стали, кг	37,23	20,25
Расход тепловой энергии, Гкал	0,22	0,02
Годовая производительность цеха, м <sup>3</sup>	11107	89142
Годовой доход, грн	4 672 381.99	6 293 488.88
Срок окупаемости новой линии		1 год 6 мес

Рассмотрев данные таблицы, необходимо отметить, что при производстве плит перекрытия маркировки ПБ используется класс бетона выше в 2 раза чем при производстве плит ПК, тем самым увеличивая прочностные характеристики изделия. Сравнивая расход стали на одно изделия видно уменьшение расхода почти на 40% при таких же прочностных характеристиках. При тепловой обработке плиты перекрытия марки ПБ затрачивается в 10 раз меньше тепловой энергии, так как не затрачивается энергия для прогрева камер ТВО. Из данных табл. 1 можно сделать вывод, что по сравнению с агрегатно-поточной технологией при безопалубочном формовании себестоимость изделий снижена в среднем на 25%. Уменьшение себестоимости достигается тем, что не нужен пар, линию обслуживают 6-8 человек и уменьшена металлоемкость изделий.

Расчеты позволили установить, что экструзионным способом количество изготавливаемой продукции в восемь раз выше, нежели полуконвейерным. Обе линии располагаются практически в одних и тех же условиях, при тождественной площади цеха.

**Выводы**

Внедрение современных технологий в производство железобетонных изделий обретает целый ряд преимуществ: произвольно назначать параметры архитектурно-конструктивных ячеек каркаса без всяких переоснасток; при таких плитах поверхность перекрытия потолка получается иде-

ально ровной; высокая производительность и надежность оборудования; высокое качество и сниженная себестоимость изделий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов Ю.М., Алимов Л.А. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов. - М.: АСВ, 2004. - 256с.
2. Евстифеев В.Г. Железобетонные и каменные конструкции. в 2 ч. Ч. 1. Железобетонные конструкции. — М.: Издательский центр «Академия», 2011. — 432 с.
3. <http://www.ksm-14.ru/technologe/tensiland.aspx> [Электронный ресурс].

***Dyakovskaya O.S. The introduction of new technologies in the production of hollow-core floor slabs.***

*In this paper, we investigate effective technology for the production of hollow-core floor slabs; the comparative analysis of the manufacturing process for aggregate-production technology and new production line "Tensiland".*

**Keywords:** *hollow-core slabs, aggregate-flow technology, technological line "Tensiland", concrete products*

Дьяковская О.С. – инженер Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: kaf\_mater@mail.ru

Шинкарева Т.А.

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЯ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Shinkareva T.A.

### METHODOLOGICAL ASPECTS OF NATURE AND RESOURCE CONSERVATION IN THE FOUNDRY INDUSTRY

Проведен анализ методологических подходов к решению проблемы загрязнения окружающей среды выбросами литейных производств и обеспечению безопасности труда.

**Ключевые слова:** природопользование, ресурсосбережение, безопасность, вредные и опасные факторы, малоотходные технологии.

#### Введение

Общие принципы использования природных ресурсов человеческим обществом в формулировке Н. Н. Куражковского звучит: «Задачи природопользования как науки сводятся к разработке общих принципов осуществления всякой деятельности, связанной либо с непосредственным использованием природой и ее ресурсами, либо, с изменяющими ее воздействиями. Конечная цель этой разработки – обеспечить единый подход к природе как к всеобщей основе труда» [1].

Основные цели природопользования [2]:

1. Рациональное размещение отраслей производства на Земле.
2. Определение целесообразных направлений пользования природными ресурсами в зависимости от их свойств.
3. Рациональная организация взаимоотношений между отраслями производства при совместном пользовании угодьями:
  - исключение вредных влияний на природные ресурсы;
  - обеспечение воспроизводства для растущих производств;
  - комплексность пользования природными ресурсами.
4. Создание здоровой среды обитания для людей и полезных им организмов:
  - предупреждение ее загрязнения и заражения в результате человеческой деятельности;
  - ликвидация естественно существующих в ней вредных компонентов и недостаточностей.

## 5. Рациональное преобразование природы.

Рациональное природопользование включает в себя ресурсосбережение, то есть разработку и внедрение ресурсосберегающих технологий, совершенствование существующих технологий, сокращение техногенных отходов и выбросов в окружающую среду, сведение к минимуму возможного ущерба здоровью людей.

Задачи и цели рационального природопользования и ресурсосбережение актуальны для литейного производства, так как для технологических процессов изготовления отливок характерны выделение пыли, аэрозолей и газов (оксиды углерода, углекислый и сернистый газы, азот и его окислы, водород, пары углеводородов и др.).

В атмосферу Земли ежегодно поступает 150 млн. т различных аэрозолей; 220 млн. т диоксида серы; 450 млн. т оксида углерода; 75 млн. т оксидов азота. В год на каждого жителя Земли приходится в среднем 300 кг выбросов в атмосферу. При производстве 1 т отливок из стали и чугуна выделяется около 50 кг пыли, 250 кг оксидов углерода, 1,5-2 кг оксидов серы и азота и до 1,5 кг других вредных веществ (фенола, формальдегида, ароматических углеводородов, аммиака, цианидов). В водный бассейн поступает до 3 м<sup>3</sup> сточных вод и вывозится в отвалы до 6 т отработанных формовочных смесей [3].

**Целью работы** является анализ методологических подходов к решению проблемы загрязнения окружающей среды выбросами литейных производств.

### **Методика исследования**

Главным аспектом является законодательство, которое определяет правовые основы государственной политики в сфере охраны окружающей среды. Народный Совет ЛНР 22.04.2016 принял в первом чтении проект закона «Об охране окружающей среды». В России 21 июля 2014 г. Принят Федеральный закон № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации», который предусматривает кардинальную реформу ряда важнейших институтов экологического права, таких как нормирование, лицензирование, государственный учет объектов негативного воздействия на окружающую среду и других. Согласно ст. 1 этого закона негативное воздействие на окружающую среду – это воздействие хозяйственной и иной деятельности, последствия которой приводят к негативным изменениям качества окружающей среды. В свою очередь нормативы качества окружающей среды – это нормативы, которые установлены в соответствии с физическими, химическими, биологическими и иными показателями для оценки состояния окружающей среды и при соблюдении которых обеспечивается благоприятная окружающая среда [4].

Стимулирующая функция платежей на негативное воздействие на окружающую среду проявляется не только в применении повышающих коэффициентов, но в учете при исчислении платежей собственных затрат предпринимателей на осуществление природоохранных мероприятий [5]. Успех внедрения природоохранных мероприятий и ресурсосберегающих технологий окупает первоначальные затраты предприятия. Нормальные условия труда повышают его привлекательность и становятся фактором положительного отношения работников к месту работы. Последнее, в свою очередь, повышает производительность труда.

Проблемы обеспечения безопасности труда и улучшения условий труда, снижения влияния выбросов вредных веществ на окружающую среду взаимосвязаны. Решать их необходимо комплексно с учетом всех видов опасностей, а именно: опасности среды деятельности человека, опасности техносферы, внешние и внутренние общегосударственные опасности, чрезвычайные опасности биосферы и др.

### **Результаты исследований**

Литейные цеха выбрасывают в окружающую среду значительное количество вредных веществ, значительно превышающих допустимые концентрации (по пыли от 3 до 12 раз, оксиду углерода - до 3 раз, фенолу - до 2,5 раз, а в селитебной зоне - по пыли до 3 раз, по фенолу до 1,2 раза) [6]. Загрязненность воздуха – одна из основных производственных вредностей в литейных цехах. Большинство операций изготовления отливок сопровождается выделением пыли, основной составляющей которой является кремнезем. Она образуется при приготовлении и регенерации формовочных и стержневых смесей, выбивке отливок из форм и их очистке, обрубке, транспортировке сыпучих материалов и т. д.

Обследование воздушной среды основных литейных цехов по картам условий труда и лабораторным замерам показало, что на всех участках имеет место значительное превышение предельно-допустимой концентрации (ПДК) пыли (см. табл. 1) [7].

Таблица 1

#### **Концентрация пыли на основных рабочих местах в литейных цехах**

Цех	Концентрация пыли на рабочих местах, мг/м <sup>3</sup> (ПДК=2мг/м <sup>3</sup> )				
	приготовление смеси	формовка	заливка	выбивка	обрубка
Чугуно-литейный	33,7	23,3	23,3	59,6	47,9
Стале-литейный	46,6	29,7	21,7	46,9	53,6

Очевидно, что при проектировании литейного оборудования необходимо предусматривать устройства по герметизации и локализации пыле-

выделений для выше приведенных данных. Разнообразие оценок условий труда на рабочих местах изготовления отливок, многообразие применяемых технологических процессов, комплекс вредных и опасных факторов не позволяет оценить экологическую ситуацию в целом всего литейного цеха.

Проведенный анализ интенсивных вредных и опасных факторов литейного производства [7] позволяет сделать вывод о необходимости на современном этапе разработки принципиально нового подхода к анализу и оценке этих факторов. При их изучении наиболее эффективно применение многофакторного регрессионного анализа.

Для разработки методологии многофакторного анализа и прогноза необходимо учитывать ряд теоретических вопросов:

- вопрос о характере статистической информации;
- вопросы отбора и анализа факторов, влияющих на результативный признак;
- вопрос адекватности построенных многофакторных моделей;
- вопросы точности и достоверности прогноза.

Литейное производство занимает одно из ведущих мест по степени ущерба наносимого окружающей среде, что ведет к росту профзаболеваемости литейщиков (см. табл. 2) и заболеваемости населения.

Т а б л и ц а 2

**Распределение профзаболеваний работников в литейных цехах**

№ п/п	Профзаболевание	%
1	Пылевой бронхит	49,6
2	Силикоз	19
3	Неврит слухового органа	26,5
4	Виброблезнь	4,9

Поэтому охрана окружающей среды является важным фактором модернизации литейного производства и должна проводиться с учетом всех видов опасностей.

**Выводы**

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что решение проблемы загрязнения окружающей среды в литейном производстве и обеспечение безопасности труда надо решать комплексно:

- на основе государственной политики в сфере охраны окружающей среды;
- с использованием методологии многофакторного анализа опасностей и прогноза вероятностей повреждения здоровья работников;

- использование современных экологически чистых малоотходных (безотходных) технологий, в том числе и компьютерное моделирование литейных процессов;
- использование современного экологического оборудования и производительных автоматизированных комплексов;
- применение эффективных систем удаления и нейтрализации вредных выбросов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Экология. Курс лекций / <http://ecology-education.ru> [Электронный ресурс]: (дата обращения 15.05.2016).
2. Дикань В.Л. Основы экологии и природопользования. Учебное пособие / В.Л. Дикань, А.Г. Дейнека, Л.А. Позднякова [и др.]. - Харьков: ООО «Олант», 2002.- 384 с.
3. Данилова Н.В. Плата за негативное воздействие на окружающую среду: первые оценки новелл законодательства / Н.В. Данилова // Финансы и управление. - 2014. - № 4. – С. 54-80.
4. Федеральный закон от 21.07.2014 N 219-ФЗ (ред. от 29.12.2015) "О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2016).
5. Лазаренков А.М. Особенности нормирования выбросов литейного производства / А.М. Лазаренков, В.Н. Бахирев // Актуальные вопросы охраны окружающей среды от антропогенного воздействия: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. 27-28 февраля 1989 г. - Севастополь, 1989. - С. 127-123.
6. Ткаченко С.С. Мониторинг производственных возможностей литейных цехов. / С.С. Ткаченко, В.С. Кривицкий // Тезисы докладов 6-й Всероссийской научно-практической конференции «Литейное производство сегодня и завтра», Санкт-Петербург, 2006 г.
7. Шинкарева Т.А. Исследование вредных и опасных факторов при применении современных литейных технологий / Т.А. Шинкарева, А.И. Гедрович, А.Н. Голофаев // Вісник СНУ ім. В.Даля. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В.Даля, 2010. – №3 (145). – С. 111-116.

***Shinkareva T.A. Methodological aspects of nature and resource conservation in the foundry industry***

*The article analyzes the methodological approaches to solving the problem of environmental pollution emissions foundries and safety at work.*

**Keywords:** *nature management, resource conservation, safety, occupational hazards, low-waste technologies.*

Шинкарева Т.А. – инженер Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: tashka.lg@mail.ru



Зубов А.Р., Чепурной А.А., Дементьев Д.И.

## К ВОПРОСУ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛУГАНСКА

Zubov A.R., Chepurnoy A.A., Dementjev D.I.

### TO THE QUESTION OF HYDROLOGICAL SAFETY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES OF LUGANSK

Предложен способ изучения динамики температуры почвы на различной глубине, основанный на применении термоэлектрического датчика. Установлены особенности хода температуры для различных слоев почвы. Разработана математическая модель промерзания почвы в зависимости от суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха и высоты снежного покрова.

**Ключевые слова:** половодье рек, наводнение, гидрологический прогноз, снежный покров, промерзание почвы.

#### **Введение**

Река Лугань, давшая название нашему городу, и благодаря которой стало возможным развитие его промышленности, является в то же время объектом, требующим к себе постоянное внимание как со стороны городской администрации, так и ученых-гидрологов. Как и для большинства равнинных рек степной зоны для Лугани характерно весеннее половодье - наиболее многоводная фаза гидрологического режима. Вызванные им разливы реки нередко достигают характера стихийного бедствия, наносящего большой ущерб жилому фонду города, его хозяйственным объектам.

Первое достоверное описание стихийного бедствия на реке Лугани относится к периоду 1809 года [1].

Наибольшими потрясениями XX века, связанными с водной стихией для десятков тысяч жителей Луганска стали разливы реки Лугань в 1903, 1917, 1963, 1985 годах, приведшие к затоплению их домов и усадеб [2, 3]. Большой ущерб был нанесен наводнением 1985 года тепловозостроительному заводу имени Октябрьской революции - крупнейшему в бывшем СССР.

Как сообщала местная газета «Ракурс», за период паводка с 14 марта по 25 апреля вода в реках Лугань и Ольховая поднялась на 2-4,6 м. В Луганской области повсеместно наблюдались подтопления населенных пунктов, близко расположенных к поймам рек. 20 марта 1985 года стало критической датой для многих жителей Каменнобродского района Луганска. В зоне подтопления оказалась значительная часть территории заводов

ОР и им. Ленина, создалась реальная угроза остановки производства”.

Поэтому задача долгосрочного прогнозирования возможных последствий многоснежных зим является очень актуальной как для Луганска, так и для многих других городов и населенных пунктов.

Основа долгосрочных прогнозов объема весеннего половодья — уравнение водного баланса [4]. Основными его элементами являются запасы воды в снежном покрове к началу весеннего таяния, осадки за период таяния и потери влаги на испарение, поверхностное задержание и инфильтрацию в почву. Последний элемент зависит от глубины промерзания почвы и ее влажности. В связи с этим роль снежного покрова приобретает двоякий характер: с одной стороны, с ним напрямую связан потенциально возможный поверхностный сток, с другой — он защищает почву от промерзания и тем снижает сток. Роль температурного режима воздуха тоже неоднозначна — с одной стороны от него зависит сохранность снежного покрова, с другой — тающий снег повышает влажность почвы [5]. Учесть все эти взаимосвязи путем детерминированного математического моделирования сложно, поэтому в практике гидрологического прогнозирования прибегают к разработке региональных методик прогнозирования на основе ретроспективного сопоставления показателей весеннего стока с условиями его формирования за длительный период предшествующих наблюдений. Необходимость разработки такой методики для рек Луганска обусловили цель и задачи наших исследований:

**Целью работы** является изучение режима промерзания почвы как одного из факторов, определяющих характеристики весеннего половодья.

Задачи исследований: 1) изучить динамику промерзания почв за многолетний период;

2) изучить роль снежного покрова в промерзании почв.

### **Результаты исследований**

Для получения необходимой информации были использованы фондовые материалы Луганского центра гидрометеорологии за 1959-1999 годы и результаты исследований, проведенных на опытном участке кафедры гидрометеорологии в зимний период 2015-2016 гг.

В ходе исследований выполнялись измерения температуры воздуха, высоты снежного покрова и измерение температуры почвы в динамике на различных глубинах.

Поскольку для мониторинга температурного режима активного слоя почвы (до 1 м) в зимнее время неприменимы стандартные колеччатые термометры Савинова, было предложено использовать измерение температуры с помощью электронного термометра (мультиметра DT383 с термопарой на шнуре), опуская его датчик на нужную глубину в пластико-

вую трубку диаметром 10 мм и длиной 100 см, заблаговременно установленную в толщу почвы.

Для проверки правомерности использования такого нестандартного подхода термомпара была оттарирована с помощью ртутного метеорологического термометра в диапазоне температур +23 – -8°C. Получен тарировочный график (рис. 1).

Уравнение связи показаний электронного и ртутного термометров имеет вид (коэффициент корреляции  $R = 0,999$ ):

$$t_{рт} = 1,103t_{эл} - 3,65 ,$$

где  $t_{эл}$  – отсчет по мультиметру,  $t_{ф}$  – показания ртутного термометра, принимаемые за истинные значения температуры.

Сопоставление измеренных значений температуры и расчетных по уравнению, показало, что среднеквадратическое отклонение последних  $\sigma = 0,46^{\circ}\text{C}$ . Теорией ошибок измерений доказано, что в интервал от 0 до  $\pm 2\sigma$  попадает 95,4% ошибок, т.е., из 100 ошибок измерений лишь пять могут оказаться больше или равны  $2\sigma$ . На основании этого в качестве предельной ошибки можно принять  $\Delta_{пред}$ , равную 0,92 см.

Так как данная точность для почвенных исследований является приемлемой, можно считать использование термомпары оправданным.

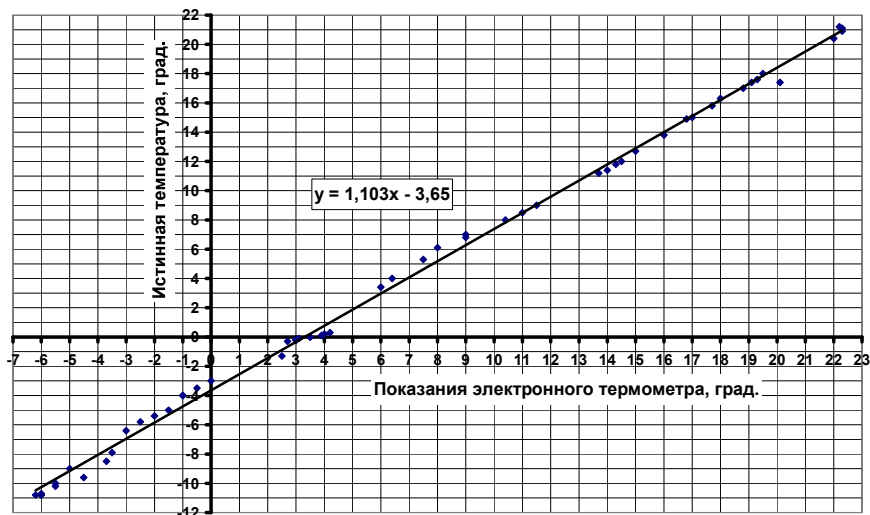


Рис. 1. Тарировочный график для корректировки показаний электронного термометра

В таблице 1 даны результаты наших измерений.

Динамика температуры почвы на разных глубинах

Дата	Сумма отрицательных температур по модулю $\Sigma(-T)$ , °С	Температура почвы (°С) на глубинах					
		5 см	10 см	20 см	30 см	40 см	50 см
24.12.15	0	3	3	3	4	4	5,5
29.12.15	9	-0,2	-0,2	0,8	2	2	3
04.01.16	85	-6,7	-8,2	-8,2	0,8	2	3
11.01.16	107	-1,4	-1,4	-0,2	-0,2	0,8	2
26.01.16	157	-6,7	-5,4	-4,2	-3,5	-1,4	-0,2

На основании данных таблицы 1 построен график изменения температуры почвы на глубинах 5, 10, 20, 30, 40 и 50 см (рис. 2).

График показывает, что зависимость температуры почвы от нарастающей суммы отрицательных температур для различных слоев неоднозначна. Для слоев глубиной менее 30 см характерно более быстрое охлаждение, однако для них характерны значительные колебания на фоне общего падения, связанные вероятно с воздействием солнечной радиации. Устойчивое снижение температуры имеет место лишь начиная с глубины 30 см.

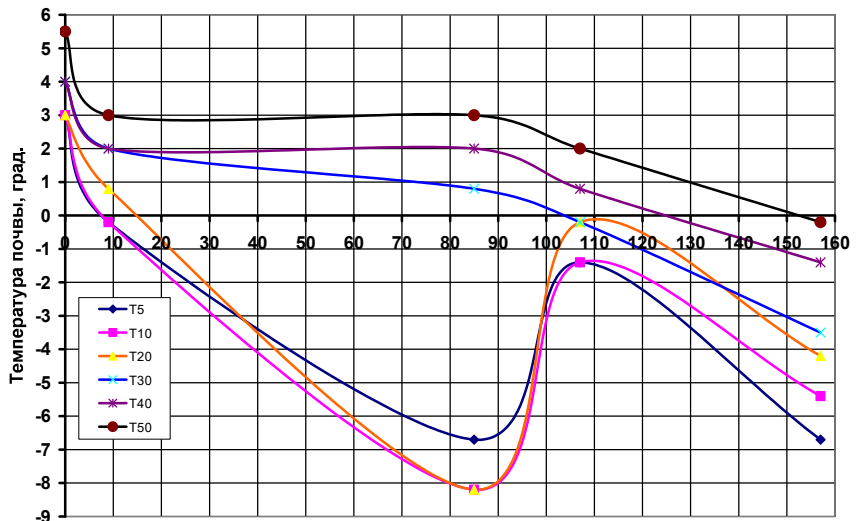


Рис. 2. Ход температуры почвы при нарастании суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха

Для изучения многолетних закономерностей промерзания почвы были проанализированы данные с 1959 по 1999 гг. Пример изменения глубины промерзания зимой 1964-1965 гг. представлен на рис. 3.

Как хорошо видно на графике, до суммы температур 200°С нарастание промерзания шло практически по прямой линии с интенсивностью 0,3 см на каждый °С, но после установления снежного покрова высотой около 15 см промерзание остановилось и даже начало немного снижаться, и только при  $\Sigma(-T) = 300^\circ\text{C}$  снова стало нарастать, но вчетверо медленнее – с интенсивностью 0,075 см/°С.

Для количественной оценки комплексного влияния отрицательных температур воздуха и отопляющей роли снежного покрова в ряду многолетних данных были отобраны три года с примерно одинаковой суммой  $\Sigma(-T)$  - до 200°С, но с различной высотой снежного покрова (5, 11 и 16 см). Используя метод Брандона, с помощью программы «Фактор», разработанной луганчанами Ф.Д.Зеленским и В.П.Голубцовым была построена двухфакторная математическая модель.

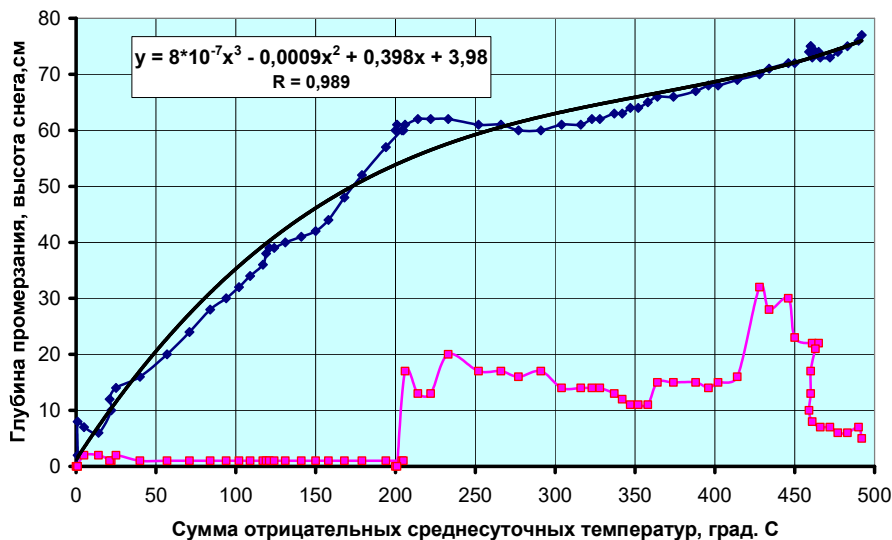


Рис. 4. Нарастание глубины промерзания почвы в зависимости от суммы отрицательных температур и высоты снежного покрова. Верхняя ломанная линия – глубина промерзания, нижняя – высота снега, кривая – линия тренда

В общем виде модель имеет вид:  $H_{\text{пр}} = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2)$ .

Параметры частных уравнений-множителей модели представлены в табличной форме:

Параметры модели промерзания почвы

№ пп	Уравнение частной зависимости	Независимая переменная $x_i$	Параметры уравнений			Коэфф. корреляции R в динамике
			a	b	c	
1	$f_1 = ax_1^b$	$ \Sigma(-T) , ^\circ\text{C}$	10,37	0,298		0,44
2	$f_2 = a + bx_2^c$	$H_{\text{сн}}, \text{см}$	1,28	-0,000106	3	0,95

Итоговый вид модели:

$$H_{\text{пр}} = 10,37 \cdot |\Sigma(-t)|^{0,298} \cdot (1,282 - 1,06 \cdot 10^{-4} \cdot H_{\text{сн}}^3),$$

где главным является фактор  $|\Sigma(-t)|$  - сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха; фактором, снижающим промерзания есть фактор  $H_{\text{сн}}$ , - высота снежного покрова, см.

### Выводы

В ходе полевых исследований установлено, что измерение температуры почвы на различной глубине наиболее удобно выполнять мультиметром с датчиком – термопарой, предельная ошибка измерений  $\Delta_{\text{пред}}$  не превышает  $1^\circ\text{C}$ ;

зависимость глубины промерзания от суммы отрицательных среднесуточных температур характеризуется очень высокой теснотой связи, определяемой коэффициентом корреляции R, равным 0,99;

снежный покров высотой около 15 см снижает скорость увеличения глубины промерзания почвы в 4 раза.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Темник Ю., Егеров Ю. Издание «Каменный Брод», Луганск, Т.1, 2003.
2. <http://www.etoretro.ru> [Электронный ресурс].
3. Лобода Н.С. Довгостроковий прогноз елементів весняного водопілля на рівнинних річках. Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни «Гідрологічні прогнози» / Н.С. Лобода, Ж.Р. Шакірзанова - Одеса, ОДЕКУ, 2003, 39 с.
4. Зубов А.Р. Влияние метеорологических условий на размер половодья рек / А.Р. Зубов, А.В. Кошурникова // Вода-источник жизни на земле (сборник статей).- Луганск, 2008. - С. 87-90.

#### ***Zubov A.R., Chepurnoy A.A., Dementjev D.I. To the question of hydrological safety of industrial enterprises of Lugansk***

*The method of study of dynamics of temperature of soil on a different depth is offered, based on application of thermo-electric sensor. The features of motion of temperature are set for the different layers of soil. The mathematical model of the frozen solid of soil is developed depending on the sum of negative average daily temperatures of air and height of snow cover.*

**Keywords:** *high water of the rivers, flood, hydrological prognosis, snow cover, frozen solid of soil*

Зубов А.Р. – д-р с.-х. наук, профессор Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: zubov-home@mail.ru

Чепурной А.А., Дементьев Д.И. – студенты Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: kaf\_gidrometeor@mail.ru

Зубова Л.Г., Олейникова М.А.

## ЮВЕЛИРНО-ПОДЕЛОЧНЫЕ И ПОДЕЛОЧНЫЕ МИНЕРАЛЫ МОРСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ОСАДКОВ

Zubova L.G., Oleynikova M.A.

### JEWELLER-CARPENTRY AND CARPENTRY MINERALS OF THE MARINE GROUND FALLOUTS

Определены морфометрические и структурные показатели терригенных наносов прибрежной зоны горного массива Крыма - Кара-Даг. Значение коэффициента множественной корреляции математической модели показывает сильную тесноту связи между морфометрическими показателями терригенных наносов. В отобранных пробах донных осадков были обнаружены такие минералы как халцедон, сердолик и горная порода – яшма. Исследованы внешние признаки и свойства донных минералов и показана их современная ювелирная ценность.

**Ключевые слова:** терригенные наносы, морфометрические показатели, математическая модель, халцедон, сердолик, яшма.

#### Введение

В настоящее время во многих странах развернуты широкие работы по исследованию морских и океанических осадков. Эти изучения очень важны, так как могут привести к практическому обнаружению на морском дне и в толще современных отложений месторождений полезных ископаемых.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи: по литературным источникам рассмотреть виды донных отложений; определить морфометрические и структурные показатели терригенных наносов прибрежной зоны горного массива Крыма - Кара-Даг; изучить внешние признаки и свойства донных минералов и показать их современную ювелирную ценность.

Донные осадки или морские отложения - это осадочные и вулканогенно-осадочные образования на дне современных древних геологических морей и океанов [1]. Осадочные отложения в зависимости от происхождения частиц, их слагающих, подразделяют на следующие виды: терригенные, биогенные, хемогенные, вулканогенные и космогенные.

Терригенные отложения состоят из продуктов разрушения берегов морскими волнами и течениями, а также из материала, принесенного реками, продуктов разрушения подводных горных сооружений. К терригенным отложениям относятся: глыбы, валуны, галька, гравий, песок, илы



материкового происхождения.

Донные отложения Черного моря (рис. 1) делят на три группы: прибрежные — до глубины 30 м, мелководные — на шельфе, глубоководные — покрывающие материковый склон и дно котловины.

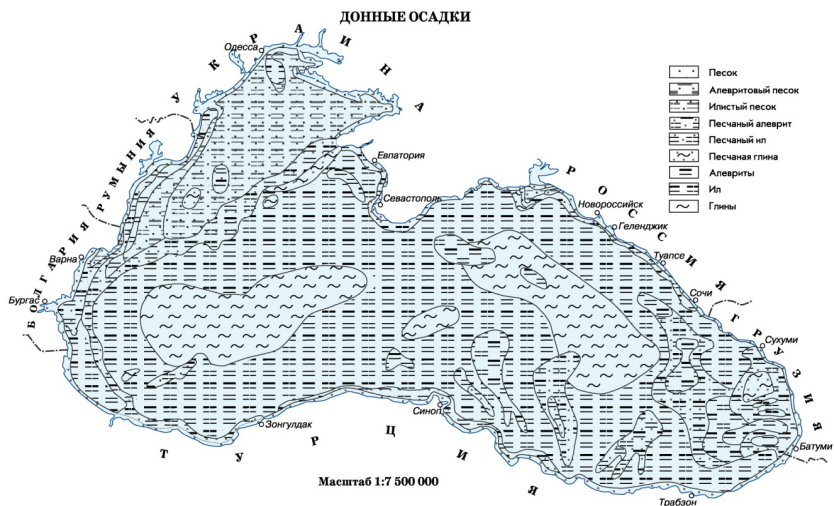


Рис. 1. Распространение донных отложений в Черном море

В прибрежной зоне преобладают крупнообломочные донные отложения: галька, гравий, пески; по мере удаления от берега их довольно быстро сменяют мелкозернистые пески и алевриты. В северо-западной части широко распространены ракушечники и современные ракушечные банки, населенные мидиями, устрицами и другими моллюсками. Для склона и ложа впадины характерны пелитовые илы, карбонатность которых возрастает к центру моря (местами превышая 50%). В юго-восточной части моря на глубинах до 2000 м встречены отложения алевритов и песков, вынесенных мутьевыми потоками.

**Цель работы:** показать важность изучения донных отложений.

### Результаты исследований

Наши пробы донных осадков представлены такими терригенными отложениями как галька, гравий и песок. Все эти материалы относятся к прибрежно-морским наносам.

Для решения задач исследований структурных показателей терригенных наносов, таких как галька, гравий и песок, был проведен гранулометрический анализ (рис.2, 3). Согласно суммарной кривой грануломет-

рического состава, песчаный грунт классифицируется как песок мелкой крупности. Коэффициент неоднородности песка определен по формуле

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \gamma \frac{0,18}{0,1} = 1,8 < 3 \quad (1)$$

Степень неоднородности  $C_u$  равна более 3, песчаный грунт является неоднородным. Так как плотность и удельный вес связаны между собой, то, при значении определенной нами плотности частиц песка  $\rho_{п} = 2,44$  г/см<sup>3</sup>, удельный вес его частиц составляет  $\gamma_{п} = 2,44$  г/см<sup>3</sup>.



Рис. 2. Результаты ситового анализа проб терригенных наносов

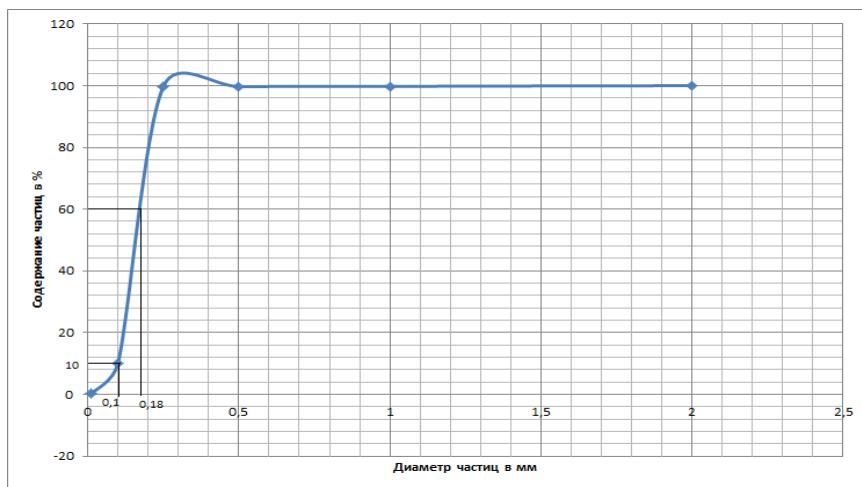


Рис. 3. Суммарная кривая гранулометрического состава

В отобранных нами пробах донных осадков были обнаружены такие минералы как халцедон (рис.4), сердолик и горная порода – яшма. Определены их внешние признаки и свойства



Рис. 4. Минерал халцедон, входящий в состав терригенных осадков

Морфометрические показатели терригенных наносов были проверены на однородность и достоверность (табл. 1-3, рис. 5).

Таблица 1

**Статистические показатели**

Показатели	Длина	Ширина	Толщина	Вес
$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$	3,004	1,97	0,64	11,22
$S^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}$	0,29	0,13	0,08	21,88
$S = \sqrt{S^2}$	0,54	0,36	0,28	4,678
$V = \frac{S}{\bar{X}} \cdot 100\%$	18,08	18,29	42,91	41,68
$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$	0,10	0,07	0,052	0,88
$S_{\bar{X}} \% = \frac{S_{\bar{X}}}{\bar{X}} \cdot 100\%$	3,42	3,46	8,11	7,88
$\bar{X} \pm t \cdot S_{\bar{X}}$	3,004±0,21	1,97±0,139	0,64±0,107	11,22±1,814

Таблица 2

**Проверка однородности данных с помощью критерия Стьюдента (t)**

Показатели	Длина	Ширина	Толщина	Вес
$X_{\text{ср.}}$	3,004	1,967	0,641	11,223
S	0,54	0,36	0,28	4,68
$X(\text{max})$	3,9	2,6	1,1	20
$t\phi = (X_{\text{max}} X)/S$	1,65	1,76	1,67	1,88
$t_t$	2,052	2,052	2,052	2,052
Вывод	$H_0$	$H_0$	$H_0$	$H_0$
$X(\text{min})$	2,1	1,3	0,2	3,38
$t\phi = (X_{\text{min}} X)/S$	-1,66	-1,85	-1,60	-1,68
$t_t$	2,052	2,052	2,052	2,052
Вывод	$H_0$	$H_0$	$H_0$	$H_0$

## Результаты расчета коэффициента вариации, асимметрии и эксцесса

Выборка	Расчетные показатели		
	$V = \frac{S}{X} \cdot 100\%$	$A = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n \cdot S^3}$	$E = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4}{n \cdot S^4} - 3$
Длина	18,08	-0,23	-1,26
Ширина	18,29	0,16	-1,29
Толщина	42,91	0,43	-1,42
Вес	41,68	0,10	-1,11

На рис. 5 в прямоугольной системе координат построены точки  $(x_i; u_{pi})$ , то есть по оси абсцисс располагаются значения  $x_i$ , по оси ординат – квантили  $u_{pi}$ . Построенные точки лежат вблизи прямой, поэтому нет оснований отвергнуть гипотезу о нормальном распределении данных.

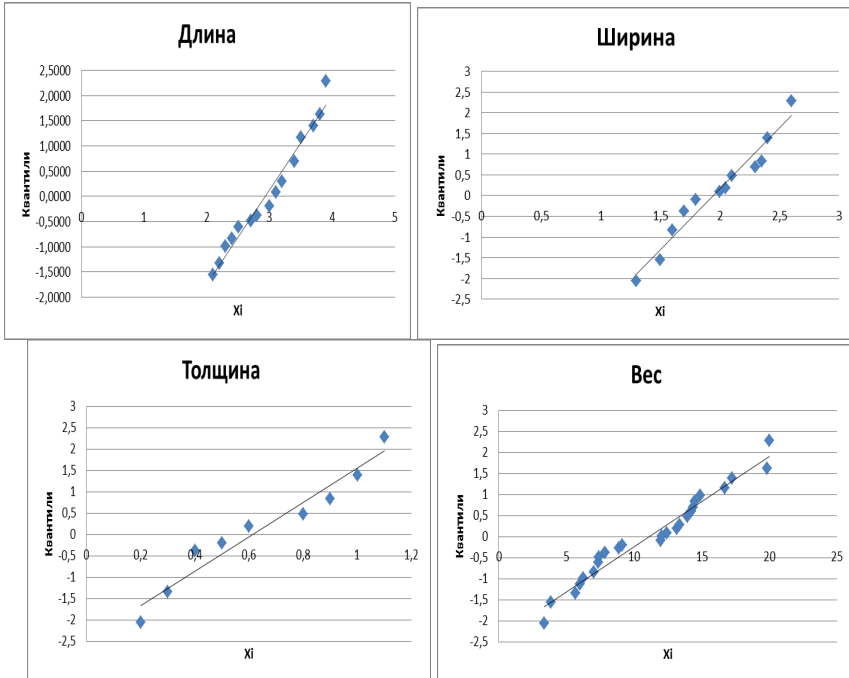


Рис. 5. Графическая проверка соответствия данных нормальному закону распределения

Для решения четвертой задачи исследований была построена математическая модель (рис. 6). Ниже представлен общий вид уравнения мо-

дели.

$$Y = (0,905 + 0,621X_1 - 0,425X_1^2) * (1,336 - 0,615X_2 + 0,0697X_2^2) * (-0,06 + 0,187X_3^{0,5}) \quad (2)$$

Значение коэффициента множественной корреляции модели R равен 0,73, что показывает сильную тесноту связи между морфометрическими показателями терригенных наносов.

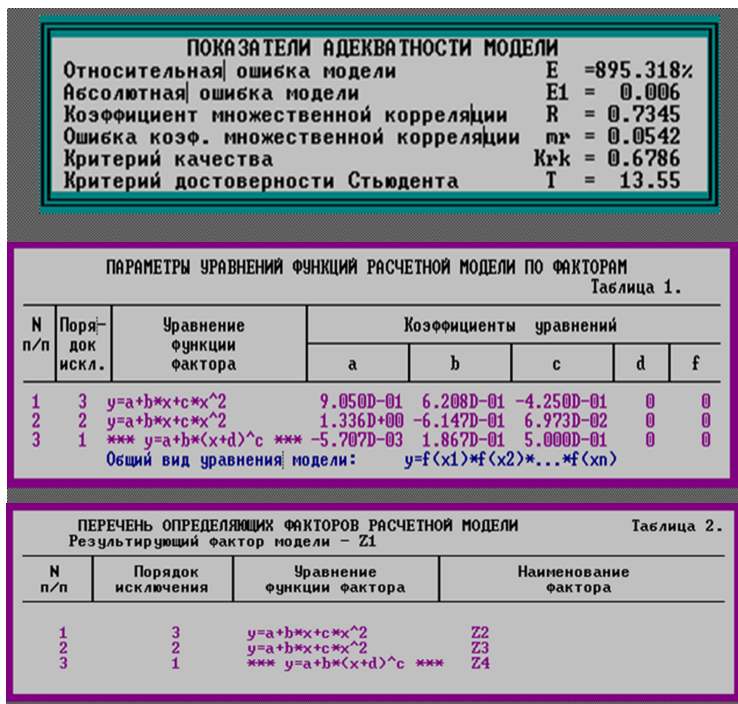


Рис. 6. Параметры и оценки значимости расчетной модели

Современная ценность донных минералов заключается в следующем. Халцедон добывался и использовался человечеством ещё с библейских времён [2]. Самая большая в мире коллекция халцедонов и ювелирных изделий из них ныне хранится и экспонируется в Эрмитаже. Среди её экспонатов – произведения искусства мирового значения.

Сердолик – один из самых древних камней на земле. Современные ювелиры используют сердолик для изготовления различных украшений: колец, кулонов, бус, браслетов. Из него делают красивые вставки в броши и геммы [2].

Камень яшма относится к самым распространенным самоцветам, которые были известны еще древнему человеку. О яшме неоднократно упоминается в Библии. В музее Санкт-Петербурга находится удивительный экспонат – яшмовая ваза диаметром 5 м и массой 11 тонн.

### **Выводы**

Определены морфометрические и структурные показатели терригенных наносов прибрежной зоны горного массива Крыма - Кара-Даг. Проведен гранулометрический анализ таких донных осадков как галька, гравий, песок. Значение коэффициента множественной корреляции математической модели  $R = 0,73$  показывает сильную тесноту связи между морфометрическими показателями терригенных наносов. Показана важность изучения донных отложений, так как в отобранных пробах были обнаружены такие минералы как халцедон, сердолик и горная порода - яшма. Исследованы внешние признаки и свойства донных минералов, показана их современная ювелирная ценность.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Морские отложения // Большая советская энциклопедия (второе издание), 1954, Т. 28, С.330-331.
2. Информационный портал «Женская жизнь» - Камни: [Электронный ресурс]. М., 2007-2014. URL: <http://woman-1.ru>.

#### ***Zubova I.G., Oleynikova M.A. Jeweller-carpentry and carpentry minerals of the marine ground fallouts.***

*The morphometric and structural indexes of terrigene alluviums of off-shore area of mountain range of Crimea - Kara-Dag are certain. Value of coefficient of plural correlation of mathematical model shows the strong crowd conditions of connection between the morphometric indexes of terrigene alluviums. In the selected tests of the ground fallouts were found out such minerals as chalcedony, cornelian and mountain breed, is jasper. External signs and properties of the ground minerals are investigational and their modern jeweller value is rotned.*

**Keywords:** *terrigenе alluviums, morphometric indexes, mathematical model, chalcedony, cornelian, jasper.*

Зубова Л.Г. – д-р техн. наук, профессор Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: [zubov-home@mail.ru](mailto:zubov-home@mail.ru)

Олейникова М.А. – студентка Луганского государственного университет им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: [zubov-home@mail.ru](mailto:zubov-home@mail.ru)

Зубова Л.Г., Павлюковская Е.И.

## ОСОБЕННОСТИ РЕЛЬЕФА МОРСКОГО ДНА, СФОРМИРОВАВШЕГОСЯ В ЮРСКИЙ ПЕРИОД

Zubova L.G., Pavlyukovskaya E.I.

### FEATURES OF RELIEF OF SEA-BOTTOM, FORMED IN A JURASSIC PERIOD

Построена ГИС и матричная модель речной сети. С помощью корреляционно - регрессионного анализа выявлено, что речная сеть, сформировавшаяся в Коктебельской долине, являющейся морским дном юрского периода, влияла на формирование современного рельефа, что подтверждается высоким коэффициентом корреляции между расчленённостью территории и средней высотой земной поверхности.

**Ключевые слова:** рельеф морского дна юрского периода, расчлененность территории, речная сеть, вулканическая бомба.

#### Введение

По территории Крыма протекает 1657 рек, ручьев и балок общей длиной 5996 км. Крымские реки не похожи на реки других местностей. Их длины, площади водосборных бассейнов, а также объёмы протекающей воды невелики [1]. В зависимости от направления стока поверхностных вод принято деление рек Крыма на три группы: реки северо-западных склонов Крымских гор, реки Южного берега Крыма, реки северных склонов Крымских гор. Все реки северо-западных склонов Крымских гор текут почти параллельно друг другу. Площади бассейнов основных рек находятся в пределах 500-600 км<sup>2</sup>, длина 40-60 км. Самые крупные реки этой группы – Альма, Кача, Бельбек и Черная. Реки северных склонов Крымских гор отличаются от рек других групп тем, что они за пределами гор отклоняются к востоку и впадают в Сиваш – лагуну Азовского моря. В верховьях рек их водность устойчива, а в пределах равнины почти нет стока в межень. К этой группе относится самая длин. Реки Южного берега Крыма короткие, имеют очень крутые уклоны русел, бурный нрав в паводки при сравнительно небольших расходах воды. Наиболее крупной рекой является р. Учан-Су [1].

**Целью работы** является изучение современных особенностей рельефа морского дна, сформировавшегося в юрский период.

Для ее достижения были решены следующие задачи: построить ГИС



и матричную модель речной сети Коктебельской долины и Кара-Дага; изучить расчлененность рельефа с построением математической модели; исследовать геологические, эдафические, фитоценотические особенности высотных точек рельефа Коктебельской долины.

### Результаты исследования

Для построения ГИС речной сети был использован программный продукт MapInfo 9.0.1. Топографическая карта с изображением п. Коктебель и долины Кара-Дага была зарегистрирована и оцифрована (рис.1).

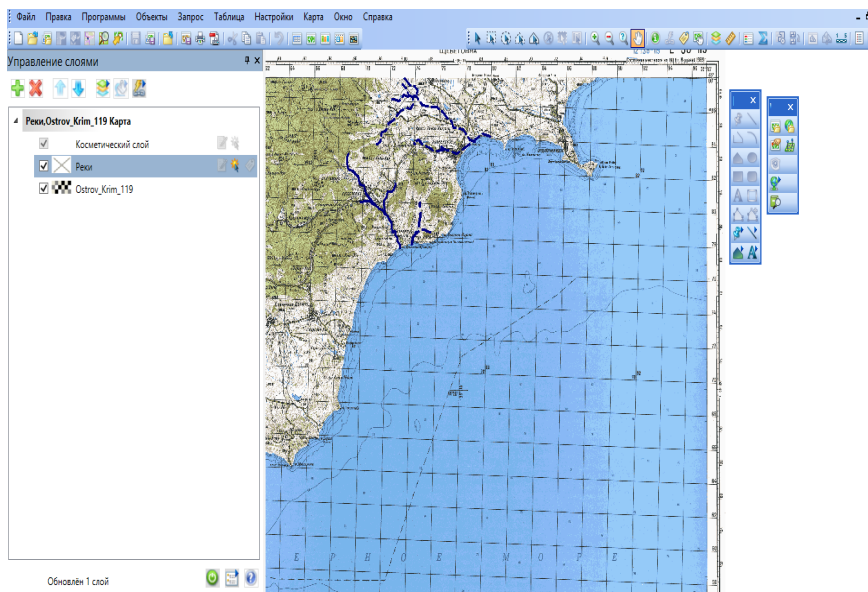
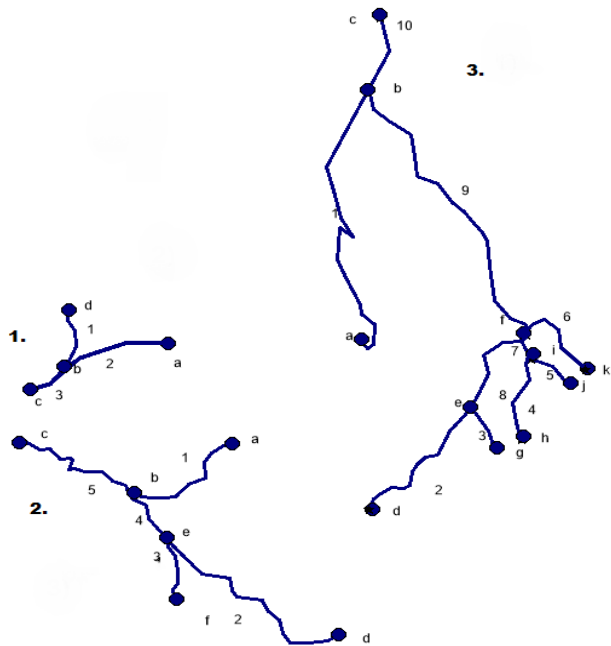


Рис. 1. Цифровая линейная гидрологическая сеть Коктебельской долины и Кара-Дага

На рис. 2 гидрологическая сеть представлена в матричной форме согласно количеству притоков (ребер) и узлов (точек их слияния). Ребра представлены числами от 1 до 5, а узлы – буквами от а до f. В матрице ребер (именно она представлена на рис. 3) ноль означает, что соответствующие притоки непосредственно не соединяются, а единица – что они соединяются.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 2. Гидрологическая сеть Коктебельской долины и Кара-Дага в матричной форме

Основными формами рельефа в Коктебельском регионе являются Коктебельская и Армутлукская долины, разделённые группой невысоких гор (г.Егер-Оба 116 м; г. Малка 123 м; г.Татар-Хабурда 236 м), между отдельными вершинами которых проходят тропы (рис. 3). Далее к северу, за Армутлукской долиной, расположена впадина Бароколь - весьма необыч-

ное тектоническое образование, на дне которого расположен чуть-ли не единственный в предгорном Крыму бессточный участок.

Регион окружен кольцом гор: хребет Кучук-Янышар (191 м) — хребет Биюк-Янышар (в западной части — 204 м) — хребет Узун-Сырт (гора Клементьева – 261 м) — вершины Коклюк, Сары-Кая, Сарытлык (445 м), Скалки, Белая, Кабак-Гаш, Матрач-Оба — вулканический массив Кара-Даг (максимальная высота 576 м - гора Святая). Уникальность Кара-Дага в том, что это единственный в Восточной Европе древний вулкан. Он отличается от всемирно известных Ключевской Сопки, Фудзиямы или Везувия. Он уже не выглядит как конус с огромным кратером посередине. Это объясняется его очень почтенным возрастом — 170-150 миллионов лет. Все современные вулканы можно назвать пра-пра-правнуками Кара-Дага.



Рис. 3. Рельеф долины

Для решения второй задачи исследований была построена математическая модель зависимости расчлененности территории от высоты ее точек над уровнем моря. Исходные данные высоты были сняты с топографической карты, расчлененность определялась как отношение суммы длин всех водотоков квадрата к площади квадрата, км/км<sup>2</sup>. Были определены статистические показатели высоты и расчлененности (табл. 1), которые позволили рассчитать однородность и достоверность исходных данных. Однородность данных проверялась с помощью критерия Стьюдента (табл. 2), достоверность подтверждалась путем использования метода спрямленных диаграмм с расчетом квантилей и построением прямых ли-

ний по точкам. С помощью корреляционно - регрессионного анализа (рис. 5) выявлено, что речная сеть, сформировавшаяся в Коктебельской долине, влияла на формирование современного рельефа, что подтверждается высоким коэффициентом корреляции между расчленённостью территории и средней высотой поверхности Земли. Коэффициент корреляции для данной модели равен 0,71. Уравнение модели имеет вид  $Y = -37,89x + 0,0538$ .

Таблица 1

**Статистические показатели**

Показатели	Зависимая и независимая переменные	
	x	y
$\bar{X} = \frac{\sum X}{n}$	170,9	0,178
$S^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}$	4905,03	0,025
$S = \sqrt{S^2}$	70	0,16
$V = \frac{S}{\bar{X}} \cdot 100\%$	40,9%	89 %
$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$	14,6	0,033
$\frac{\sum x}{\bar{x}} \% = \frac{\sum x}{\bar{x}} * 100\%$	20,85%	18,75%
$\bar{X} \pm tS_{\bar{X}}$	170,9 ± t*14,6	0,176 ± t*0,033

Для решения третьей задачи были исследованы геологические, эдафические, фитоценоотические особенности одной из высотных точек рельефа Коктебельской долины - горы Верблюд. На ее вершине были найдены различные геологические образования, свидетельствующие как о морском происхождении в целом Коктебельской долины, так и о деятельности вулкана Кара-Даг (рис. 4).

**Проверка однородности данных с помощью  
критерия Стьюдента ( $t$ )**

Показатели	Проверяемые факторы	
	x, n =23	y, n =23
$X_{\text{ср.}}$	170,9	0,176
$S$ (стандарт. отклон.)	70	0,16
$X_n$ (max)	300	0,5
$t_{\text{ф}}$	1,84	2,01
$t_{\text{г}}$	2,07	2,07
Вывод (вид гипотезы)	$H_0$	$H_0$
$X_1$ (min)	86,6	0
$t_{\text{ф}}$	1,2	1,11
$t_{\text{г}}$	2,07	2,07
Вывод (вид гипотезы)	$H_0$	$H_0$



Рис. 4. Геологические образования, свидетельствующие о морском происхождении и вулканической деятельности

Был проведен спектральный анализ вулканической бомбы, гранулометрический и химический анализ водной вытяжки почвенных образцов, отобранных на горе Верблюд; описаны физические свойства найденных минералов. Вулканическая бомба исследовалась на спектрометрической установке «РИТМ-С» (рис. 5). Наглядный вид полученных спектров ЕРН представлен на рис.6, 7.



Рис. 5. Обработка энергетических спектров источников излучений вулканической бомбы

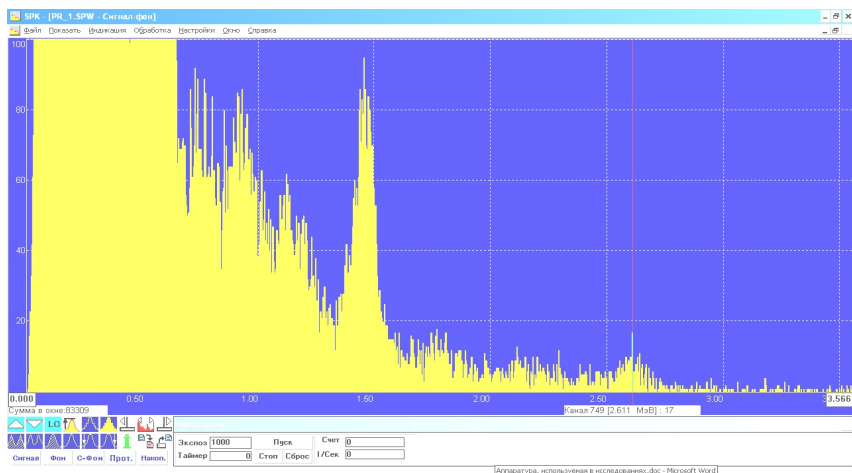


Рис. 6. Пик  $^{232}\text{Th}$  на спектре

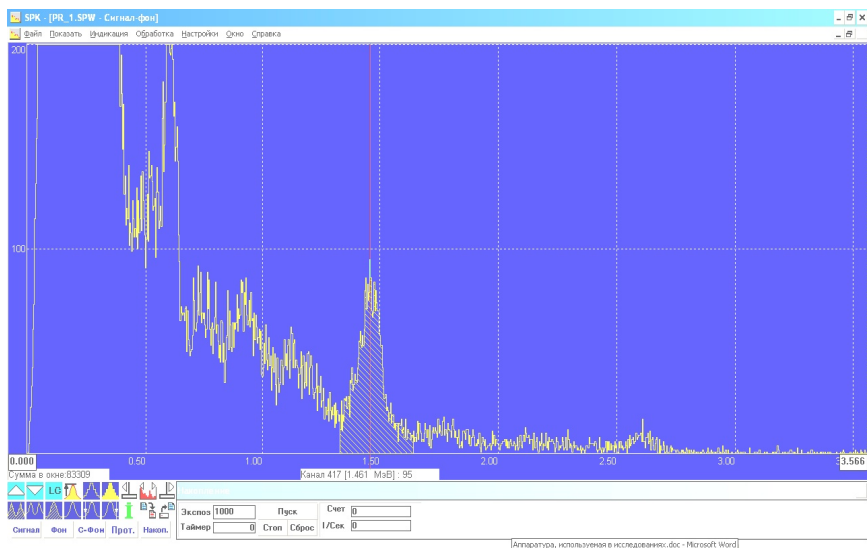


Рис. 7. Пик  $^{40}\text{K}$  на спектре

Таблица 3

**Протокол обработки спектра гамма-излучения  
вулканической бомбы**

№ п/п	Нуклид	Активность		Удельная активность		Погрешность активности, %
		Бк	мкКи	Бк/кг	мкКи/кг	
1	$^{232}\text{Th}$	69.3	0.0019	68.8	0.0019	10.2
2	$^{226}\text{Ra}$	-	-	-	-	-
3	$^{40}\text{K}$	901	0.0244	894.7	0.0242	17.2
4	$^{137}\text{Cs}$	-	-	-	-	-
Объем сосуда Маринелли, см <sup>3</sup>		Масса пробы, кг		Удельная эффективная активность, Бк/кг		Время измерения (экспозиция), сек
1000		1,0070		166.2		1000

В табл. 3 представлен протокол обработки спектра гамма-излучения вулканической бомбы.

Почвенные образцы с горы Верблюды были просеяны через сита разного диаметра. Содержимое каждой фракции было взвешено и подсчитано. На рис. 8. гранулометрический состав представлен в виде циклограммы.

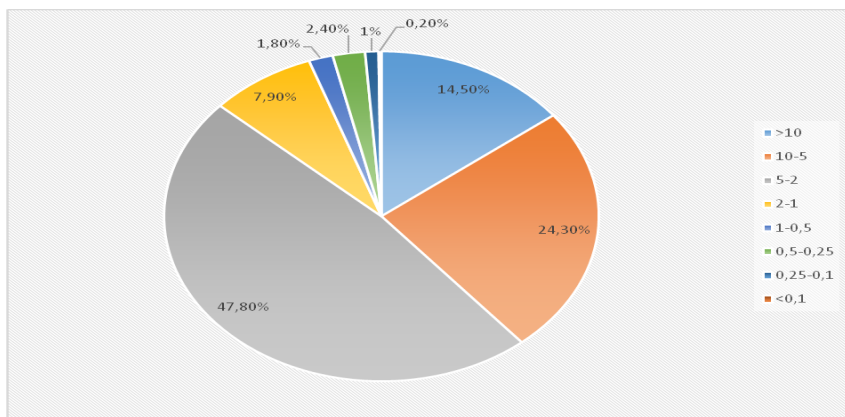


Рис. 8. Гранулометрический состав почвенных образцов, отобранных на горе Верблюд

Водная вытяжка из почвенных образцов была исследована на наличие хлор-ионов (Cl – отсутствуют), сульфат-ионов (SO<sub>4</sub> – до 100 мг/л), водородный показатель pH – 7,6.

Были определены физические свойства минералов, найденных на горе Верблюд. В качестве примера приводим физические свойства кальцита: окраска – белая, цвет черты – белый, твердость – 3, блеск – стеклянный, спайность – весьма совершенная, излом – землистый.

Растительный покров Коктебельской долины и ее высотных точек разнообразен. Флора высших сосудистых растений Карадагского природного заповедника в настоящее время насчитывает 1175 видов, таких как *Echinops ritro*, *Ephedra distachya* и др.

### Выводы

Построена ГИС и матричная модель речной сети и с помощью корреляционно-регрессионного анализа выявлено, что речная сеть влияла на формирование современного рельефа, что подтверждается высоким коэффициентом корреляции между расчленённостью территории и средней высотой поверхности Земли (0,71). На территории Коктебельской долины найдены такие геологические образования, как вулканические бомбы, которые являлись продуктами выброса лавы при извержении вулкана Кара-Даг, и отлагались на его склонах. Выполненный с помощью спектрометра-дозиметра «Ритм – С» спектральный анализ показал наличие в них 40К - 901 Бк и 232Th – 69,3 Бк. Такие количественные значения подтверждают отсутствие радиационной опасности.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Лисовский А.А. Поверхностные водные объекты Крыма (справочник) / А.А. Лисовский, В.А. Новик, З.В. Тимченко [и др.]. – Симферополь: Рескомводхоз АРК, 2004. – 113 с.
2. Зубова Л.Г. Основы математической обработки экспериментальных данных: учебное пособие / Л.Г. Зубова. - Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2013.- 60 с.

***Zubova I.G., Pavlyukovskaya E.I. Features of relief of sea-bottom, formed in a jurassic period.***

*GIS and matrix the model of river network. By cross-correlation - regressive analysis it is exposed, that a river network, formed in Koktebel'skoy to the valley, to being sea-bottom of jurassic period, influenced on forming of modern relief, that is confirmed the high coefficient of correlation between dismembered of territory and medium-altitude of terrene.*

***Keywords:*** *relief of sea-bottom of jurassic period, dismembered of territory, river network, volcanic bomb.*

Зубова Л.Г. – д-р техн. наук, профессор Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: zubov-home@mail.ru

Павлюковская Е.И. – студентка Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: zubov-home@mail.ru

Зубов А.Р., Зубова Л.Г., Арутюнян К.Г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОПОЛНЕНИЯ МИРОВЫХ РЕСУРСОВ ПРЕСНОЙ ВОДЫ

Zubov A.R., Zubova L.G., Arutjunian K.G.

### RESEARCH OF A PROBLEM OF REPLENISHMENT OF WORLD RESOURCES OF FRESH WATER

Рассмотрены способы получения пресной воды, используемые в мире, в том числе путем конденсации. Изготовлена и испытана бытовая установка для получения пресной воды, разработан алгоритм расчета производительности установок такого типа и теоретической стоимости получаемой воды.

**Ключевые слова:** пресная вода, опреснение, воздух, конденсация, генератор воды.

#### **Введение**

По данным Всемирной организации здравоохранения более двух миллиардов человек в мире страдают сегодня от нехватки питьевой воды. В ближайшие 20 лет, учитывая современные тенденции роста населения и мирового хозяйства, следует ожидать увеличения потребности в пресной воде не менее чем на  $100 \text{ км}^3$  в год [1].

На Земле имеется около 1,4 млрд.  $\text{км}^3$  воды, из которой 96,5% - соленые воды Мирового океана; 1% - соленые подземные воды; 2,5% - ресурсы пресной воды. Однако подавляющая часть пресной воды недоступна человеку, так как 68,7% ее заключены в ледниках (в основном Антарктики и Гренландии); 30,9% ( $10,5 \text{ млн. км}^3$ ) - подземные воды.

По мнению экспертов ООН, в ближайшем будущем вода станет более важным стратегическим ресурсом, чем нефть и газ, поскольку тонна чистой воды в аридном климате уже сейчас дороже нефти (пустыня Сахара и Северная Африка, центр Австралии, ЮАР, Аравийский п-ов, Центральная Азия).

Проблему дефицита пресной воды в мире пытаются устранить различными способами: ее экспортом из водообеспеченных регионов; созданием водохранилищ; опреснением морской воды.

Выработка пресной воды в мире растет высокими темпами – с  $0,09 \text{ км}^3$  в 1960 году до  $15,3 \text{ км}^3$  в 2000-м. году [2]. Согласно данным Международной Ассоциации Опреснения воды, в 2011 году в мире работали до

16000 опреснительных установок, обеспечивая водой 300 миллионов человек. Опреснение используется на морских судах и субмаринах [3].

Самыми распространёнными методами опреснения являются: дистилляция, электродиализ, ионный обмен, обратный осмос. В табл. 1 дано их сравнение.

Таблица 1

**Характеристика методов опреснения морской воды**

Параметры	Обратный осмос	Дистилляция	Ионный Обмен	Электродиализ
Физико-химический принцип	мембранная диффузия	термальное испарение и конденсация	химическая реакция	физико-химич. Реакция
Потребление электроэнергии, кВт*ч/м <sup>3</sup>	4,5	5, термальная: 40–120	40	5

В настоящее время основным источником пресной воды продолжают оставаться воды рек, озер, артезианских скважин. Однако, если во всех речных руслах находится 1,2 тыс. км<sup>3</sup>, то количество воды, находящееся в каждый данный момент в атмосфере равно 14 тыс. км<sup>3</sup>. Самый крупный источник – вода в атмосфере почти не используется. Однако эксперименты по получению воды из нее проводятся во многих районах мира.

Один из способов получения воды состоит в том, что поглощение влаги из воздуха происходит при его продуве через сорбент, который затем отдает влагу при нагреве с последующей ее конденсацией. Другое направление заключается в использовании процесса конденсации [4], который в ряде случаев экономичнее опреснения.

Технология компании Aqua Sciences основана на использовании природных солей в качестве сорбента. Автономная установка компании может быть оснащена дизельным генератором и способна производить до 10000 литров воды в сутки [5]. Пионером в области систем воды с использованием воздуха в качестве источника воды является компания Eole Water, которая изобрела ветротурбину, способную дать до 1200 литров воды в день без внешнего источника питания, используя лишь энергию ветра [6].

**Целью работы** является изучение процесса получения пресной воды путем конденсации.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Построить математическую модель естественно формирующихся продуктов конденсации.
2. Разработать алгоритм расчета производительности установки для получения пресной воды путем конденсации из воздуха.

3. Разработать и испытать бытовую установку для генерирования воды из воздуха.

### Результаты исследований

Были собраны, проверены на однородность и достоверность, обработаны математически многолетние данные по облачности, температуре, давлению и скорости ветра. Выполнено математическое моделирование с использованием компьютерной программы «ФАКТОР». Полученная двухфакторная математическая модель имеет следующий вид:

$$Y = (1,55 + 2,69x_1 + 0,597x_1^2)(0,168 - 241x_2),$$

где  $Y$  – степень покрытости небесного свода облаками в октах, характеризующая распространенность по территории участков атмосферы с высокой степенью относительной влажности воздуха и начавшимся процессом конденсации;

$x_1$  – температура воздуха, °С;

$x_2$  – атмосферное давление, мм.рт.ст.

Для решения 2-й задачи был разработан алгоритм расчета производительности установки для получения пресной воды путем процесса конденсации. Были решены две подзадачи: определение количества воды на выходе из любого генератора воды и количества затрачиваемой для этого энергии.

Ниже представлена предложенная нами блок-схема расчета производительности генератора воды (рис. 1). Исходными параметрами являются:  $Q_{\text{вх}}$  – расход воздуха через него,  $t_1$  – температура атмосферного воздуха,  $\varphi$  – его относительная влажность на входе в генератор. Управляемый параметр  $t_2$  – это температура холодильной установки. Результирующим параметром является масса конденсата ( $m_{\text{в}}$ ) и производительность установки (расход воды)  $Q_{\text{воды}}$ .

Рассмотрим пример применения алгоритма для единичного объема воздуха, равного  $1 \text{ м}^3$ , если  $t_1 = 25^\circ\text{С}$ ,  $\varphi = 50\%$ .

1. Используя психрометрические формулы, например, из [7], находим температуру точки росы  $t_p = 13,9^\circ\text{С}$ .

2. Определяем максимальное влагосодержание  $A^*_1$  воздуха при температуре  $t_1 = 25^\circ\text{С}$  по табл. 2:  $A^*_1 = 23,8 \text{ (г/м}^3\text{)}$ .

По влагосодержанию и относительной влажности  $\varphi = 50\%$  определяем абсолютную влажность воздуха  $A_1 = 11,9 \text{ г/м}^3$ . Это масса водяного пара  $m_1$  в  $1 \text{ м}^3$  воздуха.

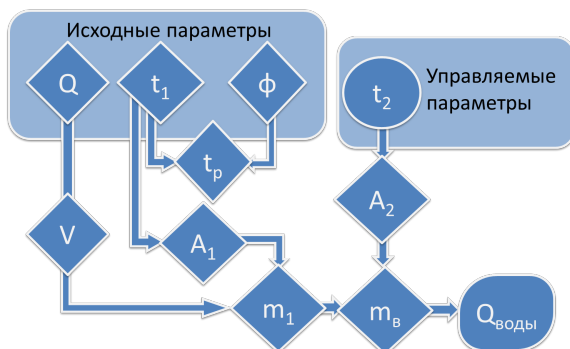


Рис. 1. Блок- схема алгоритма определения производительности генератора воды

Т а б л и ц а 2

**Максимальное влагонасыщение воздуха**

Температура, °С	0	5	10	15	20	25	30	35
$A^*$ , г/м <sup>3</sup>	5,0	6,9	9,5	13,0	17,7	23,8	31,6	41,8

3. Определяем максимально возможную массу воды  $m_2$  в воздухе при температуре охлаждения  $t_2$ , равной, например  $0^\circ\text{C}$ . Так как атмосферный воздух насыщен, его относительная влажность  $\phi$  будет равна 100%. Из табл. 2 при данной температуре  $A^*_2 = A_2 = m_2$  равна 5,0 г. Вычитая  $m_2$  из  $m_1$ , получаем разность  $m_B = 11,9 - 5,0 = 6,9$  г. Это масса воды, получаемой из 1 м<sup>3</sup> воздуха при понижении его температуры.

4. Определяем производительность генератора по формуле:

$$Q_{\text{воды}} = m_B Q_{\text{вх.г/с}} = 3,6(A_1 - A_2) Q_{\text{вх}}, \text{ кг/час.}$$

Для дальнейших расчетов найдем объем 1 кг воздуха по формуле  $V = m/\rho$ , где  $\rho$  - плотность воздуха, равная при  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  1,185 кг/м<sup>3</sup>.  $V = 1 \text{ кг}/1,185 \text{ кг/м}^3 = 0,844 \text{ м}^3$ .

Определим количество энергии, требуемой для получения воды из 1 кг воздуха. Оно имеет четыре составляющие:

1. Энергия, затраченная на охлаждение 1 кг воздуха до точки росы:  $Q_1 = (t_1 - t_p) \cdot C_1$ , где  $C_1 = 1,017$  (кДж/кг $^\circ\text{C}$ ) - удельная теплоемкость воздуха с ненасыщенным водяным паром;

$$Q_1 = (25 - 13,9) \cdot 1,020 = 11,36 \text{ кДж};$$

2. Энергия, затраченная на охлаждение 1 кг воздуха от точки росы до  $t_2$ :  $Q_2 = (t_p - t_2) \cdot C_2$ , где  $C_2 = 1,020$  (кДж/кг $^\circ\text{C}$ ) - удельная теплоемкость воздуха с насыщенным водяным паром;

$$Q_2 = (13,9 - 0) \cdot 1,029 = 14,09 \text{ кДж.}$$

3. Энергия, затраченная на компенсацию тепловыделения при конденсации воды:  $Q_3 = m_B \cdot r$ ,

где  $r$  – удельная теплота конденсации, равная 2500 кДж/кг;

$$Q_3 = 0,005 \text{ кг} \cdot 2500 \text{ кДж/кг} = 12,6 \text{ кДж.}$$

4. Затраты энергии на работу компрессора:  $Q_4 = A \cdot V$ ,

где  $V = 0,844 \text{ м}^3$  – объем воздуха массой 1 кг;

$A = P \cdot T$  – затраты энергии на прокачку 1  $\text{м}^3$  воздуха,

где  $P$  – мощность компрессора, Вт;  $T$  – продолжительность прокачки объ-

ема  $V$ :  $T = V/Q_{\text{вх}}$ .

Для 1  $\text{м}^3$  воздуха  $T = 1/Q_{\text{вх}}$ , поэтому  $A = P/Q_{\text{вх}}$ .

В нашем случае, учитывая, что  $P = 400$  Вт, а  $Q_{\text{возд}} = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ , получа-  
ем:  $A = P/Q_{\text{вх}} = 40000 \text{ (Вт)}/(\text{м}^3/\text{с}) = 40 \text{ кДж}/\text{м}^3$ ;

$$Q_4 = A \cdot V = (40 \text{ кДж}/\text{м}^3)(0,844 \text{ м}^3) = 33,76 \text{ кДж.}$$

Таким образом,  $\Sigma Q = (11,36 + 14,09 + 12,60 + 33,76) \text{ кДж} = 71,81 \text{ кДж}$   
 $= 71,81 \text{ кВт} \cdot \text{с} = 0,020 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 20,0 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$ .

В пересчете на 1 кг (1 л) получаемой воды теоретические затраты энергии составят 3,43 кВт\*ч. Поскольку в данном расчете не учтен к.п.д. процесса охлаждения воздуха, эти затраты можно считать теоретическим минимумом при данных исходных температуре и влажности воздуха. При стоимости 1 кВт\*ч электроэнергии 0,73 рублей, теоретический минимум стоимости получаемой воды будет равен 2,50 рублей за литр. Этот минимум может быть ниже, если относительная влажность воздуха будет выше 50%. Однако реальная стоимость воды будет значительно выше как за счет учета к.п.д., так и за счет учета эксплуатационных затрат и амортизационных отчислений.

Тем не менее эта стоимость будет оправдана в условиях отсутствия других возможностей получения воды.

В порядке решения третьей задачи была сконструирована, изготовлена и испытана экспериментальная установка.

Она состоит из двух блоков – нагнетающего компрессора и холодильника. Холодильник в данном конкретном случае имеет вид змеевика из алюминиевой трубки длиной 300 см и с внутренним диаметром 9 мм. Предполагается, что он должен быть размещен в морозильной камере бытового холодильника, однако для большей простоты проведения опытов его размещали в сосуде, заполняемом охлажденной водой.

В качестве компрессора использовали центробежный насос мощностью 400 кВт. Для испытания использовались приборы: психрометр, термометр, анемометр, мерный стакан, весы.

Расход воздушного потока  $Q_{\text{вх}}$ , создаваемого компрессором и проходящего через установку, определяли путем измерения анемометром скорости потока на выходе из установки. Он равен  $0,010 \text{ м}^3/\text{с} = 35,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Зная расход потока и продолжительность эксперимента  $T$  (37 мин), определили, что через установку был пропущен объем воздуха  $V^*$ , равный  $Q_{\text{вх}} \cdot T = 35,8 \cdot 37/60 = 22,2 \text{ м}^3$ .

Температура воды в холодильной установке в начале опыта  $t_{в.хол.1}$  была равной  $4,6^{\circ}\text{C}$ , в конце его повысилась до  $t_{в.хол.2} = 14,8^{\circ}\text{C}$ . Температура воздуха  $t_{вх2}$  на выходе из холодильника в начале опыта была равной  $5,6^{\circ}\text{C}$ , а в конце –  $12,4^{\circ}\text{C}$ . Этот результат показывает, что данная установка была способна за время контакта воздуха со стенками трубки змеевика охладить его почти до температуры воды в холодильнике, но за время опыта температура в холодильнике заметно повышается, и поэтому повышается температура воздуха. Следствием этого стало значительное снижение производительности установки.

В ходе работы получили следующие значения температуры сухого и смоченного термометров психрометра:  $t_{сух} = 22^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{см} = 16^{\circ}\text{C}$ . По таблицам определили, что исходная относительная влажность воздуха  $\varphi = 50\%$ , точка росы  $t_p = 9,7^{\circ}\text{C}$ .

Исходя из того, что после прохождения через холодильник абсолютная влажность воздуха  $A$  снижалась с  $9,86 \text{ г/м}^3$  до  $8,42 \text{ г/м}^3$ , т.е. на  $1,44 \text{ г/м}^3$  можно рассчитать теоретическую водоотдачу  $m_b$  из пропущенного объема воздуха  $V^*$ , равного  $22,2 \text{ м}^3$ :  $m_b = (A_1 - A_2) \cdot V^* = (1,44 \text{ г/м}^3) \cdot 22,2 \text{ м}^3 = 32 \text{ г}$ .

Фактически полученная масса конденсата была равна  $0,7 \text{ г}$ .

Из этого расхождения был сделан расчет КПД установки:  $\eta = 100\% \cdot (0,7 \text{ г}/32 \text{ г}) = 2,2\%$ .

При таком КПД ранее найденная минимальная теоретическая стоимость воды составит  $117,5$  рублей за литр.

Анализируя причины низкого КПД и производительности установки, можно предположить, что одной из них является малое время контакта воздуха со стенками змеевика. Расчет показывает, что при расходе воздуха в установке  $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$  скорость потока в трубке равна  $100 \text{ м/с}$ . Время прохождения воздуха по трубке равно  $0,03 \text{ с}$ . Можно предположить, что направлением усовершенствования установки должно стать увеличение времени прохождения установки воздухом. Для этого надо уменьшить соотношение расхода подачи воздуха и площади сечения потока.

## Выводы

1. Построенная математическая модель естественно формирующихся продуктов конденсации в свободной атмосфере характеризуется коэффициентом множественной корреляции равным  $0,41$ , что свидетельствует о хорошей тесноте связи образования облаков с давлением атмосферного воздуха и его температурой.

2. Разработанный алгоритм расчета процесса конденсации позволяет рассчитать выход воды из воздуха при ее конденсации. В частности, при исходной температуре воздуха  $25^{\circ}\text{C}$ , его относительной влажности  $50\%$  и охлаждении до  $0^{\circ}\text{C}$ , выход конденсата равен  $5 \text{ г}$  из  $1 \text{ кг}$  воздуха, потребе-

ние энергии при этом 3,43 кВт\*ч на 1 кг получаемого конденсата (без учета к.п.д. установки).

3. Выполненное физическое моделирование процесса конденсации, доказывает возможность создания установки для получения продуктов конденсации в лабораторных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Берёзкин М. Глобальная проблема нехватки пресной воды. // Научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.
2. По материалам маркетинговых исследований о воде, 2009 г. [Электронный ресурс] // <http://www.vigorconsult.ru/resources/mirovoy-rinok-presnoy-vody/>
3. Опреснение воды [Электронный ресурс] // <http://ru.knowledgr.-com/00115548>.
4. Русское географическое сообщество // Дефицит пресной воды в странах мира. Справка 13:4522.03.201023695164.
5. Компания Aqua Sciences [Электронный ресурс] // [http://www.aquasciences.com/about\\_rus.shtml](http://www.aquasciences.com/about_rus.shtml).
6. Компания Eole Water [Электронный ресурс] // <http://www.eolewater.com/>
7. Школьный С.П. Фізика атмосфери: підручник / С.П. Школьний. - К: КНТ, 2007.- 508 с.

**Zubov A.R., Zubova L.G., Arutjunian K.G. Research of a problem of replenishment of world resources of fresh water.**

*Methods are considered receipts of fresh water, utilized in the world, including by condensation. Made and tested domestic setting for the receipt of fresh water, pazapabotan algorithm of calculation of the productivity of options of such type and theoretical stoimommu of the got water.*

**Keywords:** fresh water, desalinating, air, condensation, generator of water.

Зубов А.Р. – д-р с.-х. наук, профессор Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: zubov-home@mail.ru

Зубова Л.Г. – д-р техн. наук, профессор Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: zubov-home@mail.ru

Арутюнян К.Г. – студент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: kaf\_gidrometeor@mail.ru



Луцкий Д.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВОВ Sb-Bi ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Lutskiy D.V.

### THE INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY IN THE SINGLE CRYSTALS ALLOYS Sb-Bi GROWN BY THE CZOCHRAL- SKI METHOD

Методом Чохральского выращены монокристаллы сплавов Sb-Bi с содержанием висмута до 18 ат.%. В образцах кристаллов измерены параметры удельного электросопротивления. Изучено влияние содержания висмута в кристаллах на величину удельного электросопротивления.

**Ключевые слова:** твердые растворы, градиентные кристаллы, сурьма, висмут, концентрация, электросопротивление

#### Введение

Твердые растворы сурьма-висмут находят все более широкое применение для производства высокоэффективных твердотельных охлаждающих устройств. Перспективным является также использование монокристаллов сплавов сурьма-висмут в качестве материала для создания фотоэлектрических приемников, оптических квантовых генераторов в длинноволновой области ИК-излучений, микропроцессоров для квантовых компьютеров [1]. Применение данных материалов в новых технологиях требует детального изучения всех их свойств, в том числе и электрофизических. В настоящее время электрофизические свойства сплавов Sb-Bi изучены недостаточно полно и рассматривались лишь немногими авторами [2, 3]. Поэтому исследование электрофизических свойств в твердых растворах сурьма-висмут представляет большой научный и практический интерес. В данной работе исследовано одно из основных электрофизических свойств монокристаллов Sb-Bi - удельное электросопротивление.

**Целью работы** является исследование удельного сопротивления в градиентных монокристаллах твердых растворов Sb-Bi с изменением параметров кристаллической решетки до 1 %/см, а также в кристаллах твер-

дых растворов Sb-Bi с содержанием висмута до 18 ат.% выращенных методом Чохральского без подпитки твердой фазой.

### **Методика и результаты исследований**

Выращивание кристаллов сплавов Sb-Bi осуществляли на затравочный монокристалл сплава Sb-Bi, плоскость (111) которого была параллельно направлению вытягивания. При этом концентрация висмута в затравке и выращиваемом кристалле отличались не более чем на 1 ат.%. Частота вращения кристалла составляла 10 об/мин. Тигель с расплавом массой 60 г в процессе вытягивания не вращался. Скорость вытягивания кристалла изменяли от 0,005 до 0,05 мм/мин. В качестве исходных материалов использовали сурьму и висмут чистоты 6N. Выращивание монокристаллов сплавов осуществляли в среде аргона высокой чистоты при избыточном его давлении до 0,4 атм. Образцы для исследований вырезали из кристаллов на электроискровом станке в форме прямоугольного параллелепипеда таким образом, что одна из длинных граней была параллельна плоскости (111). Поверхности образцов шлифовали с помощью абразивного порошка  $Al_2O_3$  с размером зерна 40-50 мкм, а затем полировали на замше, смоченной водным раствором абразива  $Cr_2O_3$  зернистостью до 5 мкм. Для исследования были использованы образцы из монокристаллов сурьмы и сплавов сурьмы с концентрацией висмута 3, 10, 18 ат.%, а также градиентные кристаллы с изменением концентрации висмута от 2 до 18 ат.% вдоль слитка.

Измерение удельного электросопротивления в монокристаллах сурьмы и ее сплавов с висмутом проводили с помощью двухзондового метода при комнатной температуре. Для питания электрической цепи использовали источник постоянного тока Б5-46. Ток через образец пропускали через контакты, подпаянные к торцам образца. Электрический ток, проходящий через образец, измеряли с помощью амперметра. Падение напряжения на образце измеряли микровольтметром В7-21А подключенным к зондам, которые были подпаяны к боковой поверхности образца на расстоянии  $l$  от 3 до 5 мм друг от друга в одной плоскости вдоль протекания тока. Схема измерения удельного электросопротивления приведена на рис. 1.

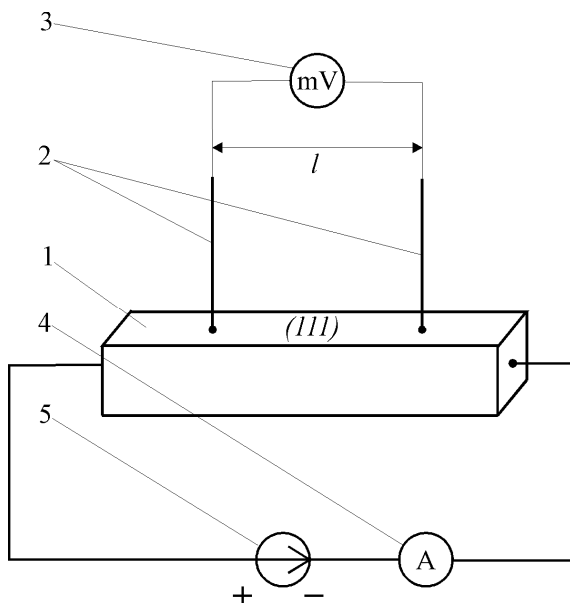


Рис. 1. Схема измерения удельного электросопротивления кристаллов сплавов Sb-Bi: 1 – исследуемый кристалл; 2 – медные зонды; 3 – микровольтметр; 4 – амперметр; 5 – источник постоянного тока

При этом удельное электросопротивление измеряемого образца определяли из соотношения [4]:

$$\rho = \frac{U_p \cdot S}{I_D \cdot l}, \quad (1)$$

где  $U_p$  – разность потенциалов между измерительными зондами, мВ;

$I_D$  – постоянный ток, протекающий через образец, А;

$S$  – площадь поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>;

$l$  – расстояние между зондами, см.

Относительная погрешность измеряемых величины удельного электросопротивления  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  составляла  $\pm 3\%$ .

Геометрические размеры и параметры образцов для расчета удельного электросопротивления приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Параметры образцов монокристаллов сплавов Sb-Bi**

№ п/п	Образец	Конц. висмута, $C_{Bi}^S$ , ат. %	Размеры образца (a×b×c), мм	Параметр	
				S, мм <sup>2</sup>	$U_p$ , мкВ
1.	Sb	0	2,1×3,0×13,8	6,3	130
2.	СВ-3Д	3	2,26×1,88×8,3	4,25	266
3.	СВ-11Д	10	1,76×1,9×8,1	3,34	467
4.	СВ-52Д	18	1,18×1,87×5,9	2,28	575
5.	СВГ-6Д	5-90	1,83×1,93×5,8	3,53	310 480 895
6.	СВГ-9Д	2,5-17	1,71×1,82×9,8	3,11	245 325 510

Результаты измерения удельного электросопротивления монокристаллов Sb-Bi приведены в табл. 2. Электросопротивление образцов монокристаллов сплавов возрастает с увеличением концентрации висмута в твердых растворах почти в два раза в сравнении с монокристаллом сурьмы. Это согласуется с опубликованными данными в работе [3].

В табл. 2. приведены измеренные значения удельного электросопротивления кристаллах в выращенных методом Чохральского без подпитки твердой фазой.

Таблица 2

**Удельное электросопротивление монокристаллов сурьмы и сплавов сурьмы с содержанием висмута 3, 10 и 18 ат. %**

№, п/п	Образец	$C_{Bi}^s$ , ат. %	$\rho$ , $10^{-6}$ Ом·м
1.	Sb	0	(0,6±0,02)
2.	СВ-3Д	3	(0,95±0,03)
3.	СВ-11Д	10	(1,3±0,05)
4.	СВ-52Д	18	(1,1±0,04)

Удельное электросопротивление градиентных кристаллов твердых растворов сурьма–висмут измеряли в трех областях: начальной, средней и конечной частях слитка. Расстояние между зондами при измерении удельного электросопротивления градиентных кристаллов устанавливали равным  $l=2,4$  мм, которое было идентично расстоянию при аналогичном измерении кристаллов Sb-Bi, вытянутых без подпитки расплава. Данные измерения удельного сопротивления градиентных кристаллов приведены в таблице 3.

**Удельное электросопротивление образцов градиентных кристаллов сплавов Sb-Bi**

№, п/п	Образец	$C_{Bi}^S$ , ат. %	$\rho, 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$		
			Начальная часть	Средняя часть	Конечная часть
1.	СВГ-6Д	5-90	(0,912±0,03)	(1,413±0,05)	(2,634±0,1)
2.	СВГ-9Д	2,5-17	(0,635±0,02)	(0,843±0,03)	(1,322±0,05)

Из табл.3 видно, что значение электросопротивления в градиентных кристаллах возрастает с увеличением концентрации висмута в слитке. Причем эти значения соответствуют значениям, измеренным в монокристаллах сплавов сурьмы с соответствующей концентрацией висмута, вытнутых без подпитки расплава (табл.2).

### **Выводы**

В монокристаллах твердых растворов Sb-Bi выращенных без подпитки с увеличением содержания висмута от 3 до 18 ат.% удельное электросопротивление возрастает от  $0,6 \cdot 10^{-6}$  до  $1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Резкое возрастание удельного электросопротивления до  $2,634 \cdot 10^{-6}$  Ом·м в градиентных кристаллах сплавов Sb-Bi может быть обусловлено значительным увеличением числа дефектов кристаллической решетки при увеличении концентрации висмута.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Hsieh D. A topological dirac insulator in a quantum spin hall phase / D. Hsieh, D. Qian, L. Wray [etc.]. // Nature. – 2008. – V. 452. – P. 970 – 975.
2. Бондарев Ю.М. Процессы дефектообразования в твердых растворах Bi-Sb / Ю.М. Бондарев, Е.В. Биричюнский, Е. Г. Гончаров // Вестник ВГУ. Серия химия, биология, фармация – 2003. – №1. – С. 5 – 8.
3. Иванова Л.Д. Выращивание монокристаллов сурьмы методом Чохральского / Л.Д. Иванова, Ю.В. Гранаткина // 11 Национальна конференция по росту кристаллов, Москва, Россия, 14-17 ноября 2004 г.
4. Павлов Л.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов / Л.П. Павлов. – М.: Высш. шк., 1975. – 206 с.

***Lutskiy D.V. The investigation of the electrical resistivity in the single crystals alloys Sb-Bi grown by the Czochralski method.***

*Sb<sub>x</sub>Bi<sub>1-x</sub> alloy single crystals with Bi composition up to 18 at% grown by the Czochralski method. The electrical resistivity in the bulk was measured. The influence of Bi composition on electrical resistivity in the single crystals was studied.*

**Key words:** *solid solutions, gradient crystals, antimony, bismuth, concentration, electrical resistivity*

Луцкий Д.В. – канд. техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: dluts@rambler.ru.

**Аветисов Р.А.**

## **ПЛОСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КРУГОВ АКВР ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ НАТЯЖЕНИИ**

**Avetisov R.A.**

### **PLANE STRESS CUTTING WHEELS DICE WHEN THEY ARE UNEVENLY STRETCHED**

Определяются напряжения в неравномерно натянутом отрезном круге с внутренней режущей кромкой. Показано, что при неравномерном натяжении окружные напряжения на режущей кромке возрастают по сравнению с равномерным натяжением. Например, при десятипроцентной неравномерности натяжения и относительном диаметре 0.4, окружные напряжения возрастают на 30 %, что может привести к выходу из строя инструмента.

**Ключевые слова:** отрезные круги, АКВР, резка монокристаллов, неравномерность натяжения, кольцевая пластина, задача Ламе.

#### **Введение**

Алмазные отрезные круги с внутренней режущей кромкой (АКВР) являются одним из наиболее распространенных инструментов для резки монокристаллов полупроводниковых материалов при изготовлении подложек интегральных схем. Одним из основных факторов, влияющих на точность, качество поверхности пластин и стойкость инструмента, является степень равномерности натяжения отрезного круга. Неравномерность натяжения также приводит к искажению формы режущей кромки, что существенным образом ухудшает качество поверхности отрезаемых пластин.

Согласно данным работы [1-4] неравномерность натяжения отрезного круга может достигать 20...50 %. Это указывает на необходимость проведения исследований по определению параметров напряженно-деформированного состояния неравномерно натянутых отрезных кругов.

**Целью работы** является определение напряженного состояния неравномерно натянутых кругов АКВР.

#### **Постановка задачи**

В работе [2] было показано, что натяжение отрезного круга, произведенное при помощи пары болтов, равномерно распределенных по его

контуру, и создающих усилие  $q_k$  от каждой пары, можно описать выражением:

$$q(\theta) = q + q_0 \cos(2\theta) \quad (1)$$

где:  $q = \sum_{k=1}^n q_k$ ;  $q_0 = \sqrt{A^2 + B^2}$   $A = \sum_{k=1}^n q_k \sin \frac{2\pi}{k}$ ,  $B = \sum_{k=1}^n q_k \cos \frac{2\pi}{k}$ ;

Таким образом, натяжение на внешней кромке представляет собой суперпозицию постоянного усилия  $q$  и гармонической составляющей с амплитудой  $q_0$ .

### Решение задачи

Будем представлять отрезной круг как круглую тонкую пластинку с внешним радиусом  $a$  и центральным отверстием радиуса  $b$ , нагруженную по наружному контуру растягивающими усилиями  $q(\theta)$  (рис. 1).

Для функции  $q = \text{const}$  плоское напряженное состояние определяется формулами Ламе для толстостенных цилиндров [3] (здесь и далее все напряжения и перемещения, вызванные постоянным натяжением  $q = \text{const}$ , будут обозначаться со штрихом):

$$\begin{aligned} \sigma'_r &= \frac{q}{1-\alpha^2} \left( 1 - \frac{b^2}{r^2} \right), & \sigma'_\theta &= \frac{q}{1-\alpha^2} \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right), \\ u'(r) &= \frac{q}{E} \frac{b}{1-\alpha^2} \left( (1-\mu) \frac{r}{b} + (1+\mu) \frac{b}{r} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда задача сводится к определению механических напряжений и перемещений в кольцевой пластинке при действии на её внешнем контуре лишь неравномерной составляющей усилия (1), а именно  $q(\theta) = q_0 \cos(2\theta)$ .



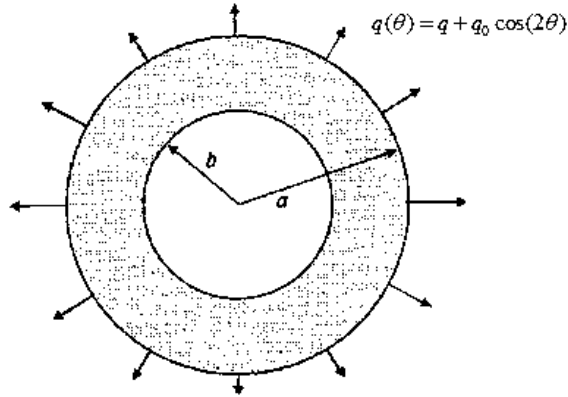


Рис. 1. - Расчетная схема кольцевой пластинки с неравномерной по контуру нагрузкой

Определение напряжений при неравномерном натяжении отрезного круга имеет как самостоятельную ценность – для оценки прочности круга, так и для дальнейшего определения перемещений, с целью определения отклонений формы режущей кромки.

Как известно, в отсутствии объемных сил функция напряжения  $\varphi$  описывается однородным бигармоническим уравнением:

$$\Delta^2 \varphi = 0,$$

где  $\Delta$  - оператор Лапласа. В полярных координатах это уравнение запишется в виде:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (3)$$

Напряжения, как известно, выражаются через функцию напряжения следующим образом

$$\sigma_r(r,\theta) = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2}, \quad \sigma_\theta(r,\theta) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2},$$

$$\tau_{r\theta}(r,\theta) = -\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right)$$
(4)

Будем искать решение уравнения (3) со следующими условиями на границе:

$$\sigma_r(a,\theta) = q_0 \cos(2\theta); \quad \sigma_r(b,\theta) = 0;$$

$$\tau_{r\theta}(a,\theta) = 0; \quad \tau_{r\theta}(b,\theta) = 0.$$
(5)

Нетрудно заметить, что этим граничным условиям удовлетворяет одно из решений Митчелла для полярных координат [3], а именно  $\varphi(r,\theta) = f(r) \cdot q_0 \cos(2\theta)$ , где  $f(r)$  - некоторая функция полярного радиуса. Подставим теперь  $\varphi(r,\theta)$  в уравнение (3):

$$9 \frac{df(r)}{dr} - 9r \frac{d^2 f(r)}{dr^2} \cdot f(r) + 2r^2 \frac{d^3 f(r)}{dr^3} \cdot f(r) + r^3 \frac{d^4 f(r)}{dr^4} = 0$$

Это нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение, которое сводится к линейному дифференциальному уравнению с постоянными коэффициентами.

Общее решение этого уравнения [3]:

$$f(r) = A \cdot r^4 + B \cdot r^2 + C \cdot \frac{1}{r^2} + D$$

и тогда для функции напряжения получим следующее выражение:

$$\varphi(r,\theta) = \left( A \cdot r^4 + B \cdot r^2 + C \cdot \frac{1}{r^2} + D \right) \cdot \cos(2\theta)$$
(6)

Между прочим, такого же вида функцию  $\varphi$  имеет задача о распределении напряжений в безграничной пластинке с отверстием, равномерно растянутой на бесконечности [3].

Подставив найденное выражение (6) в уравнения (4), получим все напряжения:

$$\begin{cases} \sigma_r(r,\theta) = -2\left(B + \frac{3C}{r^4} + \frac{2D}{r^2}\right) \cdot \cos(2\theta) \\ \sigma_\theta(r,\theta) = 2\left(6Ar^2 + B + \frac{3C}{r^4}\right) \cdot \cos(2\theta) \\ \tau_{r\theta}(r,\theta) = -\left(2D\frac{1}{r^2} - 2B - 6Ar^2 + \frac{6C}{r^4}\right) \cdot \sin(2\theta) \end{cases} \quad (7)$$

С учетом граничных условий (5), выражения (7) переходят в систему уравнений:

$$\begin{cases} 0 + B \cdot b^2 + 3C + 2D \cdot b^2 = 0; & 0 + B \cdot a^2 + 3C + 2D \cdot a^2 = -\frac{a^4}{2}q_0; \\ 3a^2A + B - \frac{3}{a^4}C - \frac{1}{a^2}D = 0; & 3b^2A + B - \frac{3}{b^4}C - \frac{1}{b^2}D = 0, \end{cases}$$

решая которую найдем все константы интегрирования:

$$\begin{cases} A = q_0 \frac{a^4(a^2 + 3b^2)}{2(3a^8 - 9a^6b^2 + 9a^4b^4 - 3a^2b^6)} \\ B = -q_0 \frac{a^4(a^4 + a^2b^2 + 2b^4)}{2(a^8 - 3a^6b^2 + 3a^4b^4 - a^2b^6)} \\ C = -q_0 \frac{a^4(3a^2b^4 + b^6)}{2(3a^6 - 9a^4b^2 + 9a^2b^4 - 3b^6)} \\ D = q_0 \frac{a^4(a^4b^4 + a^2b^6) \cdot (2a^4 + a^2b^2 + b^4)}{2(a^6b^2 + a^4b^4)(a^6 - 3a^4b^2 + 3a^2b^4 - b^6)} \end{cases}$$

Подставляя найденные постоянные интегрирования в (7), и введя обозначение  $\alpha = b/a$ , найдем окончательно все напряжения:

$$\begin{aligned}
\sigma_r(r,\theta) &= Q \left[ \alpha_0 - 2\alpha_{-2} \frac{b^2}{r^2} + \alpha_{-4} \frac{b^4}{r^4} \right] \cdot \cos(2\theta) \\
\sigma_\theta(r,\theta) &= Q \left[ -\alpha_0 + 2\alpha_2 \frac{r^2}{a^2} - \alpha_{-4} \frac{b^4}{r^4} \right] \cdot \cos(2\theta) \\
\tau_{r\theta}(r,\theta) &= Q \left[ -\alpha_0 + \alpha_2 \frac{r^2}{a^2} + \alpha_{-4} \frac{b^4}{r^4} - \alpha_{-2} \frac{b^2}{r^2} \right] \cdot \sin(2\theta)
\end{aligned} \tag{8}$$

где:

$$\alpha_0 = (1 + \alpha^2 + 2\alpha^4); \quad \alpha_{-2} = (2 + \alpha^2 + \alpha^4); \quad \alpha_{-4} = (3 + \alpha^2);$$

$$\alpha_2 = (1 + 3\alpha^2); \quad Q = \frac{q_0}{(1 - \alpha^2)^3}.$$

Для расчета прочности материалов особый интерес представляют окружные напряжения  $\sigma'_\theta(r)$ , рассчитанные по второй из формул решения Ламе (2). Полагая в (8)  $\theta = 0$ , построим график отношения амплитуды окружных напряжений  $\sigma_\theta(r)$  и  $\sigma'_\theta(r)$  как функции радиуса для круга АКВР 597×235 и со стопроцентной относительной неравномерности натяжения:  $q_0/q = 1$ . Параметры этого круга  $a = 298,5 \text{ мм}$ ;  $b = 117,5 \text{ мм}$ ,  $\alpha = 0,39$  и тогда график функции  $\frac{\sigma_\theta(r)}{\sigma'_\theta(r)}$  будет иметь следующий вид (рис. 2). На самой режущей кромке окружные напряжения при подстановке в (8)  $r = b$  и упрощения, определяются формулой:

$$\sigma_{\theta b}(\alpha, \theta) = 4q_0 \cdot \frac{1 + \alpha^2}{(1 - \alpha^2)^2} \cos(2\theta) \tag{9}$$

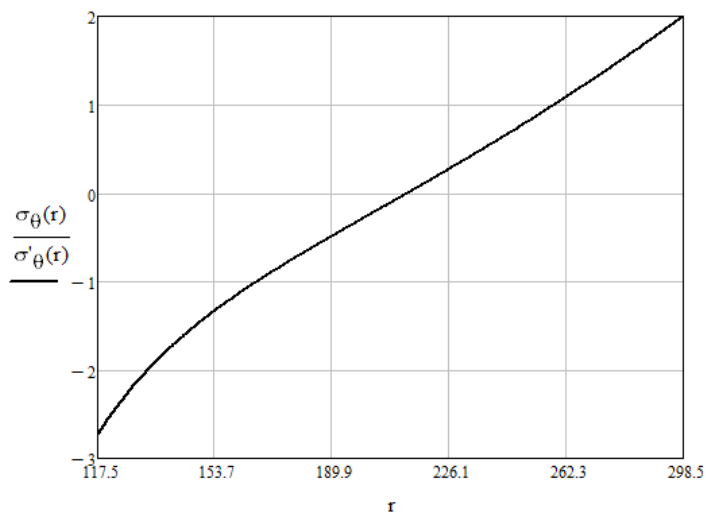


Рис. 2. - Отношение окружных напряжений от неравномерной и равномерной нагрузки

### Выводы

Найдено решение плоской задачи упругости в напряжениях для кольцевой пластинки при её неравномерном натяжении по внешнему контуру. Показано (формула (9)), что окружные напряжения растут с ростом относительного диаметра  $\alpha$ . Из формулы (9) также можно сделать вывод, что при неравномерности натяжения более 5%, окружные напряжения  $\sigma'_{\theta}$  могут превысить предел текучести материала. Последнее приводит к необходимости измерения и учета неравномерности при натяжении отрезных кругов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ерошин С.С. Причины износа кругов АКВР / С.С. Ерошин, М.Т. Таращанский // Труды 6-й Междунар. конф. «Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве». – Харьков. – 2002. – С. 107-109.
2. Таращанский М.Т. Повышение точности резки полупроводниковых монокристаллов за счет уменьшения неравномерности натяжения корпуса отрезного круга: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 – Процессы механической обработки, станки и инструменты. Луганск, 2006. – 201 с.
3. Тимошенко С.П. Теория упругости. / С.П. Тимошенко, Дж Гудьер. - М.: Наука. – 1975. – 576 с.
4. Большаков Н.А. Повышение эффективности резки слитков монокристаллов на пластины / Н.А. Большаков, А.Н. Хохлов, С.С. Ерошин [и др.]. // Электронная промышленность. – 2003. – вып. 3. – с. 139-146.

***Avetisov R.A. Plane stress cutting wheels DICE when they are unevenly stretched***

*In this paper we are determined to stress evenly tensioned cutting discs with an inner cutting edge. It is shown that at unequally-dimensional tension hoop stresses on the cutting edge increases as compared with a uniform tension. For example, if ten percent strain and unevenness ments concerning a diameter of 0.4, hoop stresses increase by 30%, which can lead to failure of the tool.*

**Keywords:** *cutting discs , DICE, cutting single crystals , uneven tension , ring plate , the Lamé problem.*

Аветисов Р.А. – инженер Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск

e-mail: shemotechnik@rambler.ru.

**Комаров Н.В., Руденко А.А., Черников Н.Г.**

## **НАНОМЕТРИЧЕСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

**Komarov N.V, Rudenko A.A., Chernikov N.G.**

### **NANOMETRIC SPECTROMETRY TO THE STUDY OF SURFACE PROPERTIES OF SOLIDS**

Предлагается нанометрический сверхвысоковакуумный фотоэлектронный спектрометр, позволяющий производить комплексные исследования поверхностных и объемных свойств твердых тел в контролируемой среде. Фотоэлектронный спектрометр позволяет определить энергетический спектр электронов, а также энергетические параметры исследуемой поверхности.

**Ключевые слова:** диагностика, вакуум, фотоспектрометр, манипулятор, вакуумный монохроматор, оже-спектрометр, дифрактометр.

#### **Введение**

За последние годы созданы оригинальные сверхвысоковакуумные многоцелевые аналитические приборы для контроля и диагностики состояния и свойств поверхности твердых тел.

Диагностика поверхности твердого тела — общее название совокупности различных методов измерения физико-химических параметров и всестороннего изучения свойств поверхности - аналитической физической химии, электрофизики, оптики, физики полупроводников, радиационной физики и физической электроники, акустики и физики плазмы, молекулярной и ядерной физики и т.д. [1, 2, 3].

Для большинства методик корпускулярной диагностики свойств поверхности твердого тела характерно использование пучков первичных возбуждающих или зондирующих частиц различного массового, зарядового и энергетического состава, ускоренных до различных энергий и падающих на границу раздела твердого тела с вакуумом под различными углами. Покидающие поверхность вторичные частицы также имеют различные массовый, зарядовый и энергетический составы и характеризуются разными угловыми распределениями. Это позволяет изучать многообразные энергетические, угловые и зарядовые зависимости и массовый (элементный) состав поверхностной области твердого тела, используя обратно рассеянные, а также распыленные или эмитируемые частицы и кванты электромагнитного излучения.

**Целью работы** является разработка нанометрического спектрометра для диагностики свойств поверхности твердого тела.

### **Методика исследований**

Выбор экспериментальной техники и конкретного метода корпускулярной диагностики свойств поверхности твердых тел определяется задачами исследования, условиями, в которых производится диагностика, необходимым уровнем получаемой информации и ее многофакторностью.

Нанометрический сверхвысоковакуумный фотоэлектронный спектрометр для исследования поверхностных свойств твердых тел предназначен для изучения электронной и кристаллической структуры, а также для химического анализа приповерхностной области моно- и поликристаллов с возможностью целенаправленного воздействия на их поверхностные свойства с помощью ионной бомбардировки, высокотемпературного отжига, адсорбции различных газов и нанесения тонкопленочных покрытий.

Был произведен расчет вакуумной системы, выбор оборудования и определение конструктивных размеров соединительных трубопроводов и арматуры [4].

### **Описание установки**

Вакуумная система установки (рис. 1) изготовлена из стали 12X18H10T и состоит из аналитической камеры (1) и системы вакуумной откачки на базе безмасляных средств. Сверхвысоковакуумный орбитронный насос (30) СОН-А-1 (предельное остаточное давление при охлаждении жидким азотом  $10^{-13}$  мм.рт.ст. и быстрота откачки по воздуху в диапазоне давлений  $10^{-8}$ —  $10^{-11}$  мм.рт.ст. 500 л/с), и насос (10) НМДО-0,25-1 (предельное остаточное давление  $5 \cdot 10^{-9}$  мм.рт.ст. и быстрота действия по воздуху при давлении  $5 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. 300 л/с) подключены к откачиваемому объекту через угловые (27, 29) клапаны КЭУТ-100. Игольчатый натекаТЕЛЬ (3) предназначен для напуска воздуха или инертного газа в откачиваемую камеру при проведении определенных технологических операций. Измерительная аппаратура представляет собой набор манометрических преобразователей: (2) — электроразрядный преобразователь ММ-14М с измерительным блоком инверсно-магнетронного вакуумметра ВИМ-2А ( $10^{-4}$  —  $10^{-13}$  мм.рт.ст.), (28) — сверхвысоковакуумный ионизационный манометр МИ-27 открытого типа с вакуумметром ВИ-14 ( $10^{-1}$  —  $10^{-10}$  мм.рт.ст.), (26) — магнитный электроразрядный преобразователь ММ-32-1 инверсно-магнетронного типа в комплекте с вакуумметром ВМБ-8 (предназначен для индикации давления в диапазоне  $10^{-2}$  —  $10^{-9}$  мм.рт.ст.), имеет аналоговый выход на ЭВМ, высокую надежность



и стабильность в работе; (9) — электроразрядный манометрический преобразователь ММ-13М-4А, действие которого основано на зависимости величины разрядного тока от давления газа с измерительным блоком вакуумметра ВМБ-3А ( $30 - 10^{-3}$  мм.рт.ст.), (17), (22) — термопарные преобразователи ПМТ-8 с блоком питания ионно-термопарного вакуумметра ВИТ-3 ( $КГ^1 - КГ^3$  мм.рт.ст.).

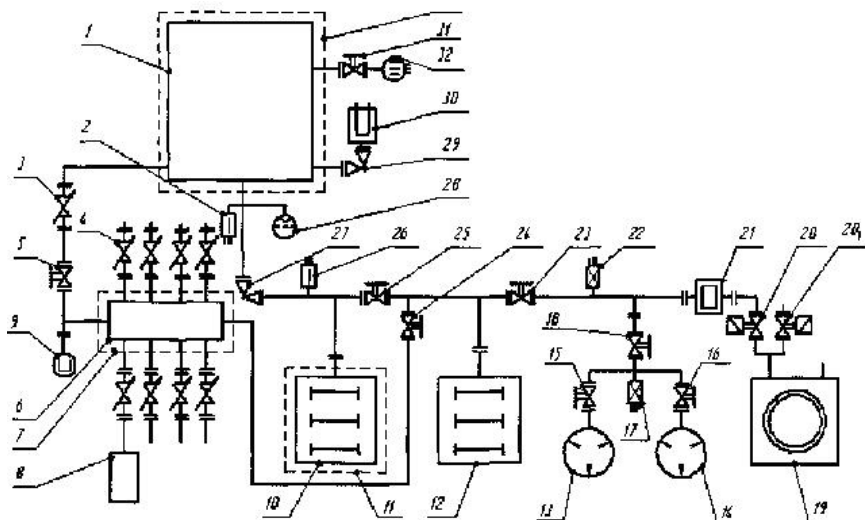


Рис. 1. Схема вакуумной системы нанометрического фотоэлектронного спектрометра: 1 - измерительная камера спектрометра; 2, 9, 17, 22, 26, 28 — аппаратура для измерения вакуума; 3 — игольчатый нагреватель; 4 - дозирующие клапаны для напуска газа; 6 — камера напуска газа; 8 — система баллонов с газами; 5, 15, 16, 18, 23, 24, 25, 31 — вакуумные клапаны; 27, 29 — вакуумные угловые клапаны; 10, 12 — магниторазрядные насосы; 30 — сверхвысоковакуумный орбитронный насос; 13, 14 — цеолитовые вакуумные насосы; 19 — вращательный двухступенчатый вакуумный насос; 21 — прогреваемая адсорбционная ловушка; 19 — вращательный двухступенчатый насос; 20, 201 — клапаны с электромагнитным приводом; 33, 11 — печь для прогрева сверхвысоковакуумной части системы; 7 — печь для прогрева камеры для напуска газа; 32 — масспектрометр

Магниторазрядный насос (12) НОРД-100-1 (предельное остаточное давление  $5 \cdot 10^{-9}$  мм.рт.ст. и быстрота действия по воздуху при давлении  $5 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. 100 л/с) предназначен для предварительной откачки вакуумной камеры (1), магниторазрядного насоса НМД0-0,25-1 при открытых клапанах (25), (27) и закрытом клапане (24). Этот насос используется также для обезгаживания и очистки объекта (10) и сверхвысоковакуумной части системы (1) от загрязнений, используя для этой цели прогрев в пе-

чах (11) и (33). Насос НОРД-100-1 при закрытом клапане (25) и открытом клапане (24) применяется для откачки и обезгаживания при прогреве при помощи печи (7) камеры напуска газа (6).

Для предварительной откачки и получения низкого вакуума используются цеолитовые вакуумные насосы ЦВН-1-2 (13), (14) и механический вращательный насос 2НВР-5ДМ (19). В случае аварийного отключения питания применяются клапаны (20), (20)] с электромагнитным приводом, что позволяет предохранить систему от напуска атмосферного воздуха в систему.

Контроль газовой среды в аналитической камере производился с помощью масс-спектрометра МХ-7304 (32). Аналитическая камера представляет собой цилиндр высотой 450 мм. и диаметром 300 мм. (рис.2.).

Вдоль оси камеры расположен трехступенной прецизионный вакуумный манипулятор [5], позволяющий производить вращательное и радиальное перемещение образцов в экваториальной плоскости, а также их вращение вокруг своей оси. Образцы закреплены на держателях специальной конструкции, позволяющих производить передачу отработанного образца из манипулятора в кассету с образцами и захват из этой же кассеты нового образца, что дает возможность исследовать четыре различных образца без вскрытия шлюзовой камеры (затвор 14 - вход в шлюзовую камеру) в одинаковых условиях.

Основными методами исследования образцов являются фотоэлектронная спектроскопия в области вакуумного ультрафиолетового излучения, электронная оже-спектроскопия и дифракция медленных электронов. Источником ультрафиолетового излучения служит высоковольтная водородная лампа с вакуумным монохроматором (рис. 3). Излучение вводится в аналитическую камеру через окно из монокристалла фтористого магния (2) и падает на образец (13), помещенный в центр анализатора фотоэлектронов (1) типа квазисферического конденсатора Лукирского. Интенсивность падающего на образец и отраженного излучения калибруется в абсолютных единицах, что позволяет измерять квантовый выход фотоэлектронов.

Измерение фотоэлектронных спектров дает возможность исследовать валентные состояния электронов в приповерхностной области образца, а также определить энергетические параметры исследуемой поверхности.

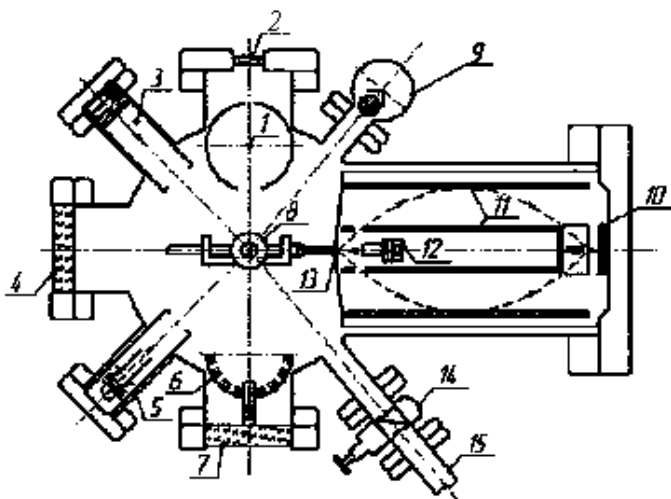


Рис. 2. Аналитическая камера нанометрического фотоэлектронного спектрометра: 1 - сферический фотоэлектронный спектрометр; 2 - окно для ввода ультрафиолетового излучения; 3 - ионная пушка для очистки и травления образца; 4, 7 - смотровые окна; 5 - электронная пушка для очистки и отжига образца; 6 - полусферический четырехсеточный дифрактометр; 8 - прецизионный манипулятор с тремя степенями свободы; 9 - монополярный масс-спектрометр; 10 - фотоэлектронный умножитель; 11 - оже-анализатор (цилиндрическое зеркало); 12 - электронная пушка оже-анализатора; 13 - исследуемый образец; 14 - затвор шлюзовой камеры; 15 - вход в шлюзовую камеру

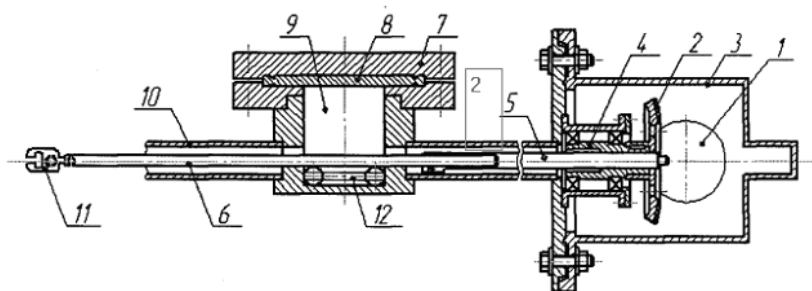


Рис. 3. Шлюзовая камера: 1 — фланец для крепления высоковакуумного ввода вращения; 2 — коническая передача; 3 — корпус камеры системы передачи движения; 4 — гайка; 5 — ходовой винт; 6 - шток; 7 — фланец; 8 — медная прокладка; 9 — камера загрузки исследуемого образца с держателем; 10 — канал шлюзовой камеры для переноса образца в аналитическую камеру; 11 — оправка шлюзовой камеры для переноса образца; 12 — каретка

Электронный оже-спектрометр (11) создан на базе электронного энергоанализатора типа "цилиндрическое зеркало" Источником возбуждения служит стандартная электронная пушка (12) типа ЭЛ01И. Химический анализ поверхности образца производится с помощью измерения интенсивности оже-линий различных элементов в спектре вторичных электронов и обеспечивает обнаружение микропримеси в количестве, соответствующем 0,01 моноатомного слоя и более. Регистрация с помощью данного анализатора спектров характеристических потерь энергии электронов позволяет исследовать плазменные возбуждения электронов в кристаллах, а также ионизационные электронные возбуждения.

Дифрактометр медленных электронов (6) создан на базе четырехсекционного квазисферического анализатора со стеклянным коллектором и позволяет (как анализатор с задерживающим полем) разделять электроны по энергиям, пропуская на коллектор часть электронов, обладающих энергией, большей величины потенциала задерживающего поля. Дифрактометр является незаменимым средством диагностики структуры поверхности твердых тел.

Т а б л и ц а 1

**Техническая характеристика спектрометра**

Предельное остаточное давление, Па	$110^{-9}$
Диапазон энергий квантов УФ-излучения, эВ	5,0 - 10,9
Степень монохроматизации УФ-излучения, эВ	0,1
Энергетическое разрешение анализатора, %	1
Диапазон измерения электронных оже-спектров, эВ	100 – 2000
Энергетическое разрешение оже-анализатора, %	0,2
Диапазон температур прогрева образцов, К	300 - 2500
Диапазон энергий ионов, эВ	$0 - 5 \cdot 10^3$

**Выводы**

В результате исследования работы нанометрического сверхвысоковакуумного фотоэлектронного спектрометра для исследования поверхности твердых тел выявлены следующие преимущества:

а) оригинальный трехстепенной манипулятор, совместно с шлюзовой камерой, позволяет проводить исследования различных образцов без вскрытия аналитической камеры;

б) возможность напуска в камеру дозированного количества одного из восьми различных газов, или их смесей, в заданных пропорциях;

в) сочетание нескольких методов исследования в одной установке, что позволяет получать более полную информацию об исследуемых образцах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Копецкий Ч.В. О развитии фундаментальных и прикладных исследований в области физико-химических и механических свойств поверхности. / Ч.В. Копецкий // Вестник АН СССР. - 1979. №9. - С. 3- 17.
2. Черепин В.Т. Методы и приборы для анализа поверхности материалов. Справочник. / В.Т. Черепин, М.А. Васильев // Киев: Наукова думка, - 1982. — с. 400.
3. Кремков М.В. Корпускулярная низкоэнергетическая диагностика поверхности твердого тела / М.В. Кремков // Академия наук Узбекской ССР. Институт электроники имени У. А. Арифов; Ташкент: изд-во «ФАН» Узбекской ССР, 1986. - 164 с.
4. Бова О.Р. Розрахунок та аналіз вакуумних систем / О.Р. Бова, І.Д. Чернікова, М.Г. Черніков // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: 36. наук. пр. Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010. - С. 193-202.
5. Бова А.Р. Сверхвысоковакуумный манипулятор в фотоэлектронной спектроскопии / А.Р. Бова, М.А. Волошин, О.Б. Латыш [и др.] // Вісник СНУ ім. В. Даля, сб. наук. праць. В 2-х частиях. Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2010, ч.2. №8 (15). - С. 134-142.

***Komarov N.V, Rudenko A.A., Chernikov N.G. Nanometric spectrometry to the study of surface properties of solids.***

*In this paper, we propose a gauge UHV photoelectron spectrometer that allows for comprehensive studies of surface and bulk properties of solids in a controlled environment. Photoelectron spectrometer to determine the electron energy spectrum and energy parameters of the surface under study.*

**Keywords:** *diagnostics, vacuum, photospectrometer, manipulator, vacuum monochromator, oze-spectrometer, diffractometer.*

Комаров Н.В. - канд. техн. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск

Руденко А.А. - канд. физ.-мат. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск

Черников Н.Г. - канд. физ.-мат. наук, доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск

Третьяк А.Е., Тугай А.В.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ШЛИФОВАЛЬНИКА НА СТАНКЕ ШЛИФОВКИ ПЛАСТИН

Tretyak A.E., Tugay A.V.

### MODELING OF WEAR OF THE GRINDING TOOL ON THE MACHINE GRINDING PLATES

Приведены результаты исследования износа шлифовальника на станке шлифовки пластин свободным абразивом. Выполнено компьютерное моделирование процесса шлифовки для скорости резания и давления.

**Ключевые слова:** шлифование, шлифовальник, шлифовка, зерно абразива, моделирование, свободный абразив.

#### **Введение**

Основным методом получения полупроводниковых подложек в настоящее время является резка слитков монокристаллического полупроводника на пластины с последующей их шлифовкой и полировкой. В процессе шлифовки полупроводниковых пластин снятие материала происходит как с поверхности пластин, так и с поверхности шлифовальников. Износ шлифовальников влияет на точность обработки полупроводниковых пластин (неплоскостность, непараллельность сторон, прогиб, разброс по толщине). С целью обеспечения высокоточного шлифования для шлифовальников устанавливают предельные значения износа, при достижении которого шлифовальники подвергаются подшлифовке (правке).

Проектирование операции доводки пластин кремния и сапфира затруднено, вследствие отсутствия адекватных методик прогнозирования формы износа рабочей поверхности шлифовальников [1, 4]. Форма же износа рабочей поверхности шлифовальников (вогнутость, выпуклость сложной формы) в значительной мере влияет на точность обработки полупроводниковых пластин (прогиб, разброс по толщине). К тому же время работы шлифовальников сказывается не только на качестве шлифования, но и на производительности в связи с этим установление факторов, влияющих на эти процессы является актуальной задачей.

**Целью работы** является исследование процесса износа шлифовальника при шлифовании полупроводниковых пластин свободным абразивом на станках односторонней шлифовки.

## Методика и результаты исследования

В основу методики исследования положено компьютерное моделирование процесса шлифовки пластин на станках с планетарной кинематикой.

Шлифование можно производить свободным и связанным абразивом. При шлифовании свободным абразивом используется стеклянный шлифовальный диск, по поверхности которого пластины совершают сложное движение (рис. 1). Абразив в виде суспензии подается на поверхность шлифовального диска. Пластины устанавливаются в специальные кассеты или наклеиваются на торец цилиндрической оправки. Зерна абразива могут сцепляться или с поверхностью шлифовального диска (при этом идет обработка пластины) или с поверхностью пластины (при этом идет износ шлифовального диска) [2].

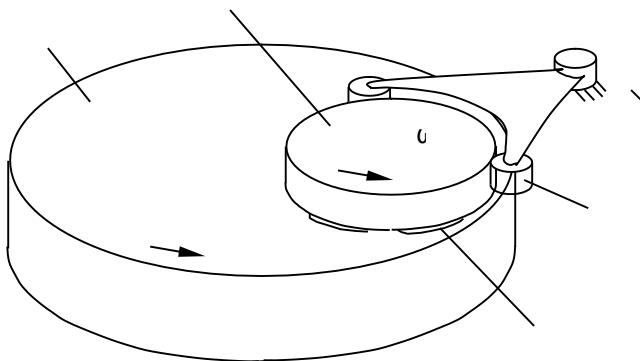


Рис. 1. Схема процесса односторонней шлифовки пластин свободным абразивом: 1 – оправка; 2 – шлифовальный диск; 3 – пластины; 4 – опорный ролик

Процесс формообразования плоской поверхности при большом количестве зерен абразива на поверхности пластины можно рассматривать как процесс непрерывного съема материала с обрабатываемой поверхности. Скорость съема зависит от скорости резания и давления:

$$Q = C_Q \cdot V^A \cdot p_n^B, \quad (1)$$

где  $Q$  – скорость съема материала,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$C_Q$  – коэффициент, зависящий от физических свойств обрабатываемого материала и абразива;

$V$  - скорость резания, м/с;

$p_n$  - нормальное давление на пластину;

$A, B$  - показатели влияния факторов, определяемые эмпирически.

При шлифовке кремния и германия  $A$  и  $B$  близки к единице, скорость резания определяется скоростью относительного движения точек шлифовальника относительно шлифуемой поверхности пластины. Необходимое давление обеспечивается весом оправки.

В схеме механизма по рис. 1 вращение оправки осуществляется за счет сил резания при скольжении пластины по поверхности шлифовальника. Для большей определенности и наглядности введем заменяющий механизм (рис.2) – фиктивный фрикционный механизм без проскальзывания с внутренним зацеплением, структура и размеры которого выбраны такими, чтобы частоты вращения звеньев 1 и 3 при работе были такими же, как и у реального механизма.

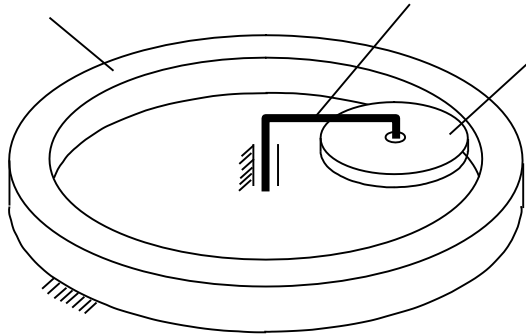


Рис. 2. Кинематическая схема заменяющего механизма с внутренним зацеплением для случая остановленного шлифовальника: 1 – подвижное колесо; 2 – водило; 3 – неподвижное колесо

Для анализа кинематики процесса шлифования используется прием остановки одного из звеньев, например, шлифовальника. Зададим всему механизму вращение с угловой скоростью  $(-\omega_2)$ . Таким образом, мы пришли к схеме планетарного фрикционного механизма с внутренним зацеплением, водило которого вращается с угловой скоростью  $(-\omega_2)$ , а подвижное колесо – с угловой скоростью  $(\omega_1 - \omega_2)$ . Траектория движения любой точки  $T$  подвижного колеса представляет собой траекторию движения соответствующей точки  $T$ , принадлежащей пластине, по шлифовальнику. Семейство этих траекторий характеризует износ шлифовальника [3].



Для вывода уравнений движения точки  $T$  рассмотрим схему на рис. 3. Малый круг радиуса  $r$  катится без скольжения внутри большого, причем вектор  $CT$  связан с плоскостью малого круга. Координаты точки  $T$  задаются следующими формулами:

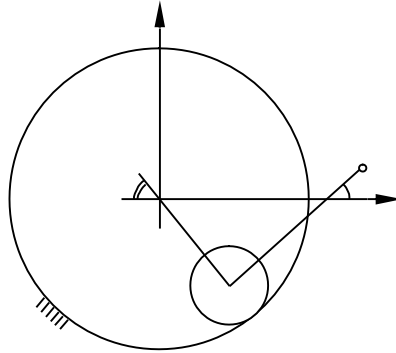


Рис. 3. Схема для вывода уравнений движения точек пластины по шлифовальнику

$$x = p \cdot \cos \alpha + d \cdot \cos \beta , \quad (2)$$

$$y = p \cdot \sin \alpha - d \cdot \sin \beta , \quad (3)$$

где  $\alpha = -\omega_2 \cdot t$ ;

$$\beta = (\omega_1 - \omega_2) \cdot t ;$$

$d$  - длина отрезка  $CT$  ;

$p$  - длина отрезка  $OC$  ;

$t$  - время.

Введя в последние уравнения соотношение:

$$w = \frac{\omega_1}{\omega_2} , \quad (4)$$

получим траекторию движения точки  $T$  в параметрическом виде:

$$x = p \cdot \cos \alpha + d \cdot \cos [(1 - w) \cdot \alpha] , \quad (5)$$

$$y = p \cdot \sin \alpha - d \cdot \sin [(1 - w) \cdot \alpha] . \quad (6)$$

Для определения скорости скольжения частиц абразива по шлифовальнику уравнения (3) надо продифференцировать:

$$V_x = \frac{dx}{dt}, \quad (7)$$

$$V_y = \frac{dy}{dt}, \quad (8)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}. \quad (9)$$

С помощью уравнений (3) – (9) можно определить, в каких точках траектории будет максимальная скорость скольжения и, следовательно, наибольший съем материала (износ) шлифовальника. Поскольку схема обработки является симметричной относительно центра вращения шлифовальника, то распределение износа последнего зависит только от расстояния от центра вращения.

Используя уравнения (3), (5) и (6), можно с помощью Mathcad, version 14.0.0.163 построить траектории движения зерен абразива, определить скорости резания в разных точках траектории и проанализировав расположение этих точек смоделировать распределение износа шлифовальника по радиусу (рис. 4).

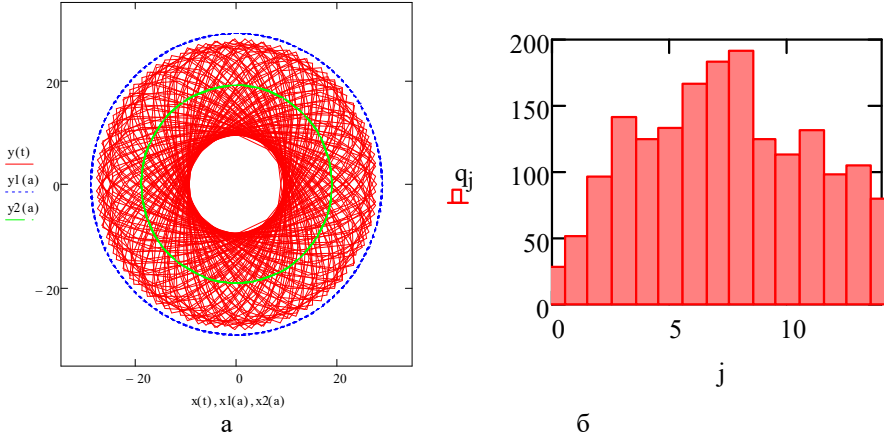


Рис. 4. Траектория движения зерна абразива (а) и распределение износа шлифовальника по радиусу (б)

## Выводы

При помощи программы Mathcad и приведенных уравнений была создана математическая модель, позволяющая проанализировать процесс резания пластин и рассчитать форму износа шлифовальника.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Муратов Р.А. Влияние некоторых технологических параметров на производительность и качество финишной обработки монокристалла / Р.А. Муратов, А. М. Ханов, Е. А. Гашев [и др.]. // СТИН. 2015. № 3, ВАК
2. Муратов К.Р. Шлифование монокристалла связанным абразивом / К.Р. Муратов, Е.А. Гашев, А.М. Ханов // СТИН. 2015. № 4, ВАК
3. Ханов А.М. Влияние вида абразива и величины контактного давления на процесс доводки керамики / А.М. Ханов, Е.А. Гашев, К.Р. Муратов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Машиностроение. 2015. Т. 15. № 1, ВАК
4. Ханов А.М. Управление траекторией рабочего движения при доводке плоскостей // А.М. Ханов, К.Р. Муратов, Е.А. Гашев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, №1(3). С. 667-669
5. Аникин А.В. Компьютерное моделирование операции доводки пластин-подложек ИМС / А.В. Аникин, Г.Р. Сагателян, А.И. Хохлов // ПЭМ-2006: Труды девятой международной научно-технической конференции - Дивноморское, 2006. – С. 219 - 221.

### ***Tretyak A.E., Tugay A.V. Modeling of wear of the grinding tool on the machine grinding plates***

*The results of wear of the grinding tool on the machine grinding plates free abrasive are presented. A computer simulation of the process of grinding for cutting speed and pressure was performed.*

*Keywords: grinding, grinding tool, grinding, abrasive grain, simulation, free abrasive.*

Третьяк А.Е. - канд. техн. наук., доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск

Тугай А.В. – магистрант Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск  
e-mail: tae41@mail.ru.

**Коструб В.А., Вербская Л.М.**

**АНАЛИЗ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ПЛЕТЕЛЬНО-ПУЛТРУЗИОННОГО ПРОЦЕССА  
ФОРМОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ  
СИЛОВОГО НАБОРА**

**Kostrub V.A., Verbskaya L.M.**

**ANALYSIS OF THE THERMOKINETIC PARAMETERS OF  
BRAIDING-PULTRUZION PROCESS OF FORMATION OF  
COMPOSITE CORES OF THE POWER SET**

Проведен анализ процесса полимеризации композитных стержневых сложно-армированных элементов, применяемых в качестве элементов силового набора автомобильных и авиакосмических конструкций. Приведены рекомендации по оптимальному выбору технологических параметров.

**Ключевые слова:** композитный стержень, полимеризация, техпроцесс, армирующее волокно, связующее, ролтрузия, степень наполнения.

**Введение**

Как известно, конструкции на основе композиционных материалов обладают целым рядом уникальных свойств, актуальных при создании агрегатов и конструкций автомобильной техники. Это и коррозионная стойкость, и ударопрочность, и высокая вибро- и энергоемкость. Широкое применение композиционных материалов в конструкциях различного назначения обуславливает создание более совершенных композитных структур и разработку технологических процессов для их реализации в конкретных изделиях. В этой связи значительный интерес представляют непрерывные процессы получения длинномерных стержневых изделий на основе волокнистых композитов.

Стержневые композитные профили находят применение в качестве силовых и подкрепляющих элементов автомобильных, авиакосмических, корабельных конструкций, причем характер их нагружения обуславливает действие нагрузки преимущественно в осевом направлении [1]. Такого рода стержневые элементы изготавливаются, в большинстве своем, методом пултрузии [2,3], позволяющем получать длинномерные изделия с высокими скоростями изготовления. Однако пултрузионные композитные профили, в силу однонаправленности армирования, обладают невысокими сдвиговыми и трансверсальными характеристиками и низкой прочностью

при продольном сжатии, величину которых определяют параметры матрицы и адгезия между волокнами и связующим. Для устранения указанных недостатков целесообразно вводить один или несколько слоев вспомогательной трансверсальной арматуры путем спиральной обмотки, оплетки и т.п. Однако реализация такого вспомогательного армирования оказывается весьма затруднительной в сочетании с непрерывным процессом формования при пултрудировании.

**Целью работы** является исследование технологического процесса ролтрузии, позволяющего совместить пространственное армирование с непрерывным формованием длинномерных профилируемых стержней на основе волокнистых композитов для элементов силового набора авиационных и автомобильных конструкций [2, 3].

### Методика и результаты исследования

Отличительными особенностями такого метода являются введение в технологический регламент операции нанесения вспомогательной арматуры, и также использование в качестве формирующего тракта приводных профилированных роликов (см. рис. 1).

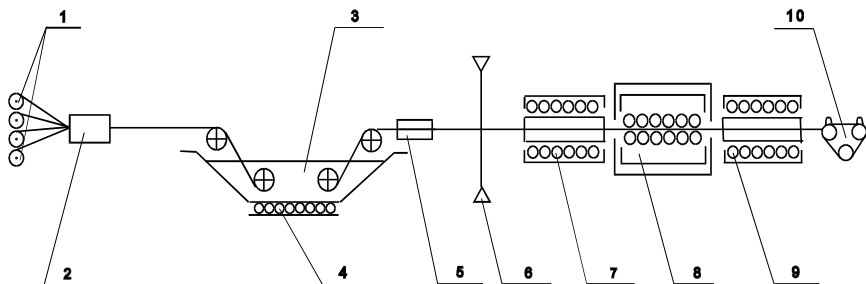


Рис. 1. Схема непрерывного технологического процесса формования профиля методом “ролтрузии”: 1 - шпулярник; 2 - распределительное устройство; 3 - пропиточная ванна; 4 - нагревательный элемент; 5 - отжимная фильера; 6 - обмоточный узел; 7 - термокамера предварительной обработки; 8 - формирующие ролики; 9 - полимеризационная термокамера; 10 - протягивающее устройство.

Причем, синхронизация скорости протягивания со скоростью вращения формирующих роликов позволяет значительно снизить деформативность армирующего материала и искажение его структуры в процесс формования.

Важнейшей стадией процесса ролтрузии наряду с нанесением вспомогательной арматуры, является прохождение пропитанного терморективным связующим волокнистого материала через зону формования.

Скорость процесса определяется в первую очередь скоростью полимеризации терморективного связующего. Варьируемыми технологическими параметрами этой стадии процесса являются термокинетические параметры - распределение температурных полей в формирующем роликовом тракте и скорость протягивания. В сочетании с длиной формирующего тракта они определяют температурно-временные условия формирования профильного стержневого изделия. Установление взаимосвязи этих факторов с целью оптимизации режимов формирования (температурных полей формирующего тракта, скорости и усилия протягивания) является чрезвычайно сложной задачей.

В формирующем роликовом тракте происходит уплотнение армирующего наполнителя, перераспределение связующего в материале и его отверждение до степени, обеспечивающей формостабильность профильного изделия и допустимый уровень его физико-механических свойств. Связующее в результате реакции полимеризации претерпевает объемное расширение и усадку, а также релаксационные превращения при переходе из вязко-текучего состояния через гелеобразование в эластическое, а затем и в твердое стеклообразное состояние. При этом соотношение термокинетических параметров ролтрузионного процесса связано с мощностью нагревателей, длиной и теплоемкостью формирующего тракта, а также с теплофизическими и адгезионными свойствами формируемого изделия и величиной экзотермического эффекта при отверждении.

Для описания взаимосвязи термокинетических параметров ролтрузионного процесса может быть использована упрощенная одномерная термокинетическая модель, основанная на решении связанной задачи теплопроводности и теплообмена в системе профиль-формирующий тракт с помощью общего уравнения Дамкелера для потока тепла в одном направлении [4] и уравнения кинетики отверждения связующего

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = F(\lambda) \cdot e^{-E(\lambda)/RT(t)} \quad (1)$$

$$\rho C_p S \frac{\partial T}{\partial t} - \psi S \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho C_p S V_{\text{ПР}} \frac{\partial T}{\partial x} + h\Pi(T - T_{\text{CP}}) - \rho Q_0 S \frac{\partial \lambda}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Указанная модель позволяет определить тепловой режим формируемого материала при нагревании и охлаждении, а также промежуточную и конечную степень отверждения связующего. При этом должны учитываться следующие технологические параметры процесса ролтрузии: размеры и формы армирующего тракта, исходя из поперечного сечения профиля и длины тракта  $L_{\text{ф}}$ ; скорость протягивания  $V_{\text{ПР}}$ , температура

нагревателей формующего тракта  $T_{\phi}$ , предварительный подогрев профиля на входе в формующий тракт до температуры  $T_0$  и начальную степень отверждения связующего  $\lambda_0$ .

В связи с этим возникает необходимость экспериментального определения теплофизических характеристик профиля, распределения температурных полей в формующем тракте и формируемом материале, а также кинетических параметров изотермического отверждения связующего совместно с наполнителем.

Экспериментальные исследования указанных характеристик были проведены на действующей ролтрузионной установке при формировании прямоугольного профильного стержневого изделия на основе стекловолокнистого армирующего наполнителя и эпоксидного связующего, модифицированного стеаратом цинка.

С этой целью отбирались образцы с учетом скорости, температуры и положения изделия в формующем тракте. Определение степени отверждения связующего проводилось методом экстракции растворителем фракции связующего, не связанного химически с полимерной сеткой, результаты представлены на рис. 2, 3, 4. Их анализ показывает, что при соответствующем подборе скорости протягивания и температуры в формующем тракте может быть получена требуемая степень отверждения связующего в изделии. Причем, увеличение температуры до  $250^{\circ}\text{C}$  не приводит к существенному повышению степени отверждения, а увеличение длины формующего тракта позволяет повысить скорость протягивания, т.е. увеличить производительность процесса.

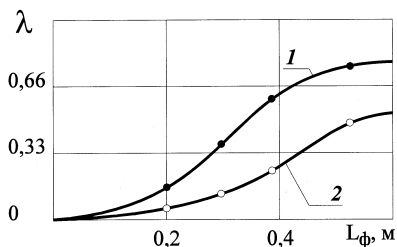


Рис. 2. Изменение степени отверждения стеклопластикового стержня по длине ролтрузионного тракта в зависимости от температуры формования.

1.  $T_{\phi} = 250^{\circ}\text{C}$ . 2.  $T_{\phi} = 160^{\circ}\text{C}$ .

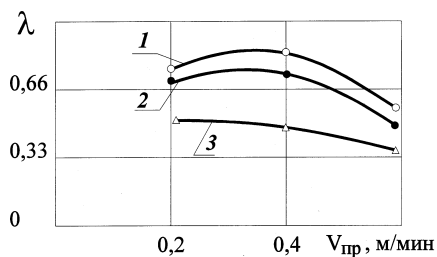


Рис. 3. Зависимость степени отверждения стеклопластикового стержня от скорости протягивания 1.  $T_{\phi} = 250^{\circ}\text{C}$ ; 2.  $T_{\phi} = 220^{\circ}\text{C}$ ; 3.  $T_{\phi} = 160^{\circ}\text{C}$ .

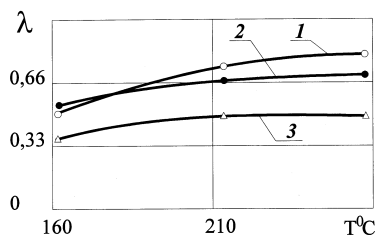


Рис. 4. Зависимость степени отверждения стеклопластикового стержня от температуры в формующем тракте.

Весьма важную роль в процессе отверждения изделия играет распределение температурных полей по длине формующего тракта, направленное изменение которых позволяет регулировать степень отверждения связующего в изделии. С этой целью были проведены исследования изменений температуры в формующем тракте и в формируемом профильном изделии

Эксперименты показали, что распределение температурного поля по длине формующего тракта носит параболический характер с небольшим плато и смещается при изменении положения нагревателей (рис. 5). Влияние скорости протягивания на изменение температурного поля формующего тракта показано на рис. 6. Из представленных данных видно, что при увеличении скорости протягивания пик температурного поля смещается к выходу из формующего узла, при этом несколько изменяется динамика процесса нарастания температуры. Было установлено, что максимальная температура материала на  $7-8^{\circ}\text{C}$  превышала температуру формующего узла, что связано, очевидно, с экзотермичностью процесса полимеризации.

Анализ степени отверждения связующего полученных образцов позволил оптимизировать температурный режим процесса формования



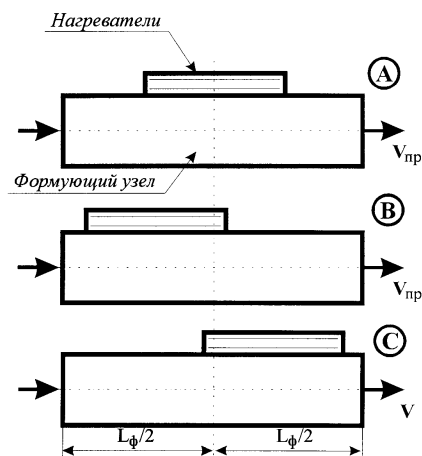


Рис. 5. Схема расположения нагревателей по длине формирующего тракта

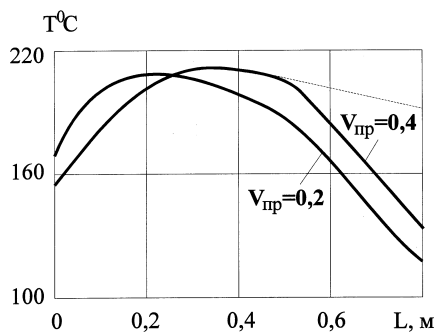


Рис. 6. Изменение температуры в композите при различной скорости протягивания (положение нагревателей А, температура нагревателей 220<sup>0</sup>С).

## Выводы

Проведенные исследования режима термической обработки профильных стержневых изделий позволяют выбирать рациональное распределение температурных полей и оптимизировать скорость протягивания и длину формирующего тракта при изготовлении стержневых композитных изделий методом ролтрузии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бичков С.А. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів / С.А. Бичков, О.В. Гайдайчук, В.С. Гайдайчук [та ін.]. - К. ІСДО: - 2005. - 406 с.
2. Коструб В.А. Расчет технологических параметров плетельно-пултрузионного процесса изготовления профильных композитных стержней // Наука – образова-

- нию, производству, экономике. Материалы IX междунар. науч-техн. конф. Т. 1. Изд-во БНТУ, Минск. 2011. – С. 352..
3. Коструб В.А. Основы системного проектирования композитных стержней для автомобильных конструкций / В.А. Коструб, О.В. Могілевцев // Тези Міжнар. наук.-техн. конф. «Комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті». Луцьк: Кафедра АУВП ЛНТУ. – С. 60.
4. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. - М.: Химия - 1976. - 232 с.
5. Лыков А.В. Тепломассообмен. / А.В. Лыков - М.: Энергия. - 1972. - 560 с.

***Kostrub V.A., Verbskaya L.M. Analysis of the thermokinetic parameters of braiding-pultrusion process of formation of composite cores of the power set***

*Analysis of complex-reinforced elements of composite bars used as elements of automobile and aerospace constructions power set polymerization process has been performed. Recommendations to optimum choice of technological parameters have been given.*

**Key words:** *composite bar, polymerization, technological process reinforcing fiber, binder, roltrusion, filling degree.*

Коструб В.А., к.т.н., доц., доцент кафедры «Машиноведение» ЛГУ им. В.Даля.

Вербская Л.М., магистр кафедры «Машиноведение» ЛГУ им. В.Даля.

Коструб В.А., Меликбекян А.Х., Вербская Л.М.

## ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СИЛОВЫХ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Kostrub V.A., Melikbekyan A.Kh., Verbskaya L.M.

### FEATURES OF THE CHOICE OF PARAMETERS PRODUCTION OF THE POWER COMPOSITE CORES

Проведен силовой анализ нагружения сложноармированных композитных стержней, получены рекомендации по оптимальному выбору ряда конструктивно-технологических параметров.

**Ключевые слова:** композитный стержень, спиральное армирование, вспомогательная арматура, степень наполнения, технологический параметр, полимеризация.

#### Введение

Как известно, в современных условиях, характеризующихся высоким уровнем развития высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, важную роль играет использование конструкций, имеющих высокую степень массового совершенства. Разработка таких конструкций для автомобилестроения возможна на основе использования современных композиционных материалов. Получение изделий из таких материалов неразрывно связано с методом их изготовления. При этом, в случае изготовления стержневых длинномерных изделий из композиционных материалов в серийном и массовом производстве, целесообразно использовать непрерывные высокопродуктивные методы производства. Однако создание сложных схем армирования при получении таких стержней непрерывными способами встречает ряд затруднений.

Разработанные в настоящее время методы введения дополнительной арматуры недостаточно эффективны и имеют сложное аппаратное оформление [1]. Кроме того, при формовании таких изделий ограничена скорость реализации процесса, форма и размер поперечного сечения в силу значительных усилий, возникающих при протяжке.

**Целью работы,** в связи с этим, является разработка высокопроизводительных энергосберегающих процессов изготовления сложноармированных композитных стержневых изделий, а также создание научных ос-

нов для расчета их основных структурно-технологических параметров и параметров технологического оборудования для их реализации.

### **Методика и результаты исследования**

Разработан системный подход к проектированию структуры и расчету параметров техпроцесса изготовления сложноармированных композитных стержневых изделий в зависимости от их типоразмера и назначения. Он основан на плетельно-пултрузионной технологии с формованием в роликовом тракте – ролтрузии и позволяет осуществлять выбор оптимальных структурно-технологических параметров. Стержневые изделия автомобильного назначения, изготовленные методом ролтрузии имеют высокую степень массового совершенства, а также обладают повышенной энергоемкостью и коррозионной стойкостью. При этом скорость изготовления составляет от 0,2 до 0,5 м/мин

При получении сложноармированных стержневых изделий возникает ряд структурных особенностей.

Как известно, введение пространственного армирования однонаправленных композитных стержневых изделий, существенно повышает их физико-механические характеристики [1]. При этом возникает ряд специфических проблем, связанных с реализацией процесса введения вспомогательной арматуры, с положением операций пространственного армирования в регламенте технологического процесса.

Рассмотрим известный процесс спирального армирования. Как показано в работах [2, 3], нанесение спиральной обмотки на продольные коаксиальные слои пропитанного волокнистого материала, позволяет на 10-15% повысить сдвиговые и трансверсальные характеристики и на 20-40% прочность при сжатии. Наличие на поверхности полуфабриката спиральной обмотки, не связанной жестко с основным материалом, приводит к нарушению ее структуры которой при прохождении формующего тракта. Поэтому, с целью обеспечения стабильности и непрерывности процесса получения сложноармированных профильных стержневых композитных изделий, а также для сохранения структуры материала, необходимо, чтобы на поверхности полуфабриката слой вспомогательной арматуры имел такую структуру, которая не нарушалась бы при прохождении формующих устройств. Такой структурой обладает плетеный слой вспомогательной арматуры. Причем, изменяя количество оплеточных нитей, угол их укладки и размер ячейки плетения, можно в широких пределах изменять параметры вспомогательного слоя. Для оценки влияния оплетки на несущую способность стержневого элемента рассмотрим энергетический баланс при сжатии профиля некруглого поперечного сечения. (рис.1).

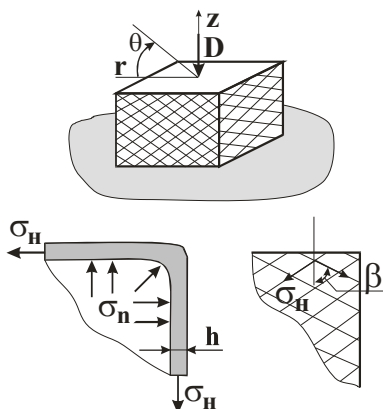


Рис. 1. К анализу НДС при сжатии стержня с внешним слоем оплетки

Действие сжимающей силы  $P$  вызывает в стержне напряжение  $\sigma_z$ , направленные в направлении основной арматуры. При этом пакет продольных волокон основной арматуры, ограниченный по периметру тонким оплеточным слоем, находится в состоянии всестороннего растяжения. На границе контакта основная арматура-оплетка возникают нормальные напряжения  $\sigma_n$ , а в нитях оплетки - растягивающие напряжения  $\sigma_H$ . Пусть угол ячейки оплетки -  $2\beta$ , тогда напряжения в оплеточной нити можно определить как

$$\sigma_H = -2\sigma_z \sin \beta \frac{E_H}{E} \frac{\nu_{r\theta} \nu_{rz}}{\nu_{zr} \left( 2 + \frac{h\Pi \sin \beta}{F} \frac{E_H}{E} \frac{\nu_{r\theta}^2 \nu_{rz}}{\nu_{zr}} \right)}, \quad (1)$$

где  $E_H, E$  - модули упругости нити и основного материала соответственно;

$h$  - толщина оплетки;

$F, \Pi$  - площадь и периметр поперечного сечения профиля, соответственно;

$\nu_{r\theta}, \nu_{rz}, \nu_{zr}$  - коэффициенты Пуассона.

При выводе формулы (1) предполагалось, что профиль имеет застильную оплетку, т.е. расстояния между соседними нитями таковы, что не оказывают влияния на равномерность распределения напряжений в материале. Таким образом, вспомогательный слой оплеточной арматуры

рассматривался условно как сплошной тонкий слой материала, обладающий анизотропией свойств в различных направлениях.

В результате принятых допущений можно определить нормальные напряжения, возникающие на границе контакта основной и вспомогательной арматуры:

$$\sigma_n = 1,8\sigma_z \frac{H}{r} \sin \beta \frac{E_H}{E} \frac{v_{r\theta} v_{rz}}{v_{zr} \left( 2 + \frac{h\Pi}{F} \sin \beta \frac{E_H}{E} \frac{v_{r\theta}^2 v_{rz}}{v_{zr}} \right)}, \quad (2)$$

где  $r$  - радиус кривизны контура профиля.

Как видно из выражения (2), характер нормальных напряжений зависит от кривизны контура профиля. Для выпуклых участков ( $r > 0$ )  $\sigma_n$  - сжимающее напряжение, для вогнутых ( $r < 0$ )  $\sigma_n$  - отрывающее напряжение, на прямолинейных ( $r \rightarrow \infty$ ) -  $\sigma_n$  стремится к нулю.

Если прочность однонаправленного профиля обозначить  $\sigma_0$ , то теоретическое значение прочности такого же профиля, подкрепленного слоем вспомогательной оплетки, можно определить из выражения:

$$\sigma_{z_{\max}} = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{v_{r\theta}^2 v_{rz}}{v_{zr}} \cdot \frac{E_H}{E} \frac{h\Pi \sin \beta}{F} \right]. \quad (3)$$

Как видно из выражений (2) и (3), прочность при сжатии профильных элементов, подкрепленных слоем вспомогательной арматуры, введение такого же слоя позволяет повысить несущую способность стержней, причем для стержней закрытого профиля поперечного сечения прочность при сжатии определяется прочностью на разрыв материала вспомогательной арматуры. Для профилей открытого типа, имеющих вогнутые участки, вспомогательный слой также оказывает положительное влияние на несущую способность, однако в этом случае определяющее значение играет величина межслоевой прочности границы раздела: основной материал - вспомогательная арматура.

Таким образом, введение слоя внешней вспомогательной оплетки повышает несущую способность профильных стержневых элементов на основе волокнистых наполнителей. Причем степень повышения, как следует из (3), прямо пропорциональна толщине вспомогательного слоя  $h$ . Однако увеличение толщины  $h$  ведет, при неизменной площади попе-

речного сечения  $F$ , к уменьшению доли основной арматуры, что в свою очередь снижает несущую способность стержня. Кроме того, для увеличения толщины вспомогательного слоя, необходимо либо увеличить число носителей нитей, либо использовать нити большей линейной плотности, что создает определенные технические сложности и ведет к снижению скорости протягивания.

Более технологичным и достаточно легко реализуемым технически является введение внутреннего слоя тонкой спиральной обмотки, нанесенного перед укладкой плетеного слоя. Для предотвращения смещения таких слоев, при прохождении формующих устройств, необходимо между обмоточным и оплеточным слоями укладывать коаксиальный слой основной арматуры, который обеспечивает связь между обмоткой и оплеткой. Наличие внутренней спиральной обмотки не только повышает несущую прочность стержневого элемента, но и существенно понижает его склонность к расслоению. что объясняется локализацией внутри коаксиального слоя магистральных трещин, возникающих при сжатии в направлении основного армирования.

Одной из особенностей при получении полуфабриката является то, что формообразующей поверхностью для раскладки основной арматуры является цилиндрическая оправка, с которой полуфабрикат стягивается протягивающим устройством и поступает в зону формования. То есть, полуфабрикат представляет собой полую трубку с коаксиальными слоями основной и дополнительной арматуры, при этом связующее находится в неотвержденном состоянии. Профиль сечения стержня, формируемого из такого полуфабриката, может иметь любую другую форму. Таким образом, площади поперечных сечений полуфабриката и готового изделия различны. При этом периметры коаксиальных слоев арматуры в процессе формоизменения остаются неизменными и определяются периметром вспомогательного слоя арматуры. Естественно, что при степени наполнения полуфабриката  $\varphi'$  и готового изделия  $\varphi$  по основному материалу различны, а так как в изделии эта характеристика задается конструктивно, то в полуфабрикате она должна иметь некоторую расчетную величину. Причем, сохранение формы трубчатого полуфабриката может быть обеспечено только в случае. если степень наполнения каждого последующего коаксиального слоя будет не больше степени наполнения предыдущего, т.е.

$$\varphi_0 \geq \varphi_1 \geq \dots \geq \varphi_n, \quad (4)$$

где  $n$  - число коаксиальных слоев.

Как было установлено в [2], если степень наполнения  $i$ -го слоя в из-

делии  $\varphi_i$ , то можно с достаточной степенью достоверности принять

$$\varphi'_i = \varphi_i \frac{\pi}{4}. \quad (5)$$

### **Выводы**

На основании проведенного энергосилового анализа получены зависимости для оптимального выбора структурно-технологических параметров при изготовлении сложноармированных композитных стержней.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Бичков. С.А. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів / С.А. Бичков, О.В. Гайдайчук, В.С. Гайдайчук, [та ін.]. - К. ІСДО: - 2005. - 406 с.
2. Коструб В.А. Анализ силовых параметров процесса ролгузии / В.А. Коструб, О.В. Могілевцев // Энерго- та ресурсо-зберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування. Матер. 4-ої міжвузівської наук.-техн. конф. викладачів, молодих вчених та студентів (05-06 грудня 2012 р.). Донецьк. – 2012. – С. 121-123.
3. Коструб В.А. Некоторые особенности изготовления профильных изделий из композиционных материалов / В.А. Коструб, В.Ю. Богданович, Л.М. Смирнова // Междунар. науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых «Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта – 2010». – 2010. – С.47-50.

#### **Kostrub V.A., Melikbekyan A.Kh., Verbskaya L.M. Features of the choice of parameters production of the power composite cores**

*Power analysis of complex-reinforced composite bars loading has been performed. Recommendations to optimum choice of a number of design-technological parameters have been obtained.*

**Key words:** composite bar, spiral reinforcement, auxiliary reinforcing, filling degree, technological parameter, polymerization.

Коструб В.А., к.т.н., доц., доцент кафедры «Машиноведение» ЛГУ им. В.Даля, г. Луганск

Меликбекян А.Х., к.ф.-м.н., доц., доцент кафедры «Машиноведение» ЛГУ им. В.Даля, г. Луганск

Вербская Л.М., магистр, ассистент кафедры «Машиноведение» ЛГУ им. В.Даля, г. Луганск



Коструб В.А., Вербская Л. М.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ СТЕРЖНЕЙ МЕТОДОМ РОЛТРУЗИИ

Kostrub V.A., Verbskaya L.M.

### RESEARCHING OF THE FORMATION PROCESS OF COMPOSITE CORES BY ROLTRUSION METHOD

Исследован процесс формования композитных стержней методом роллтрुзии. Определены оптимальные соотношения термокинетических параметров роллтрузии - скоростей протяжки изделия и отверждения связующего с распределением температурных полей в зоне формования

**Ключевые слова:** композитный материал, стержень, техпроцесс роллтрузии, формование, связующее, полимеризация.

#### **Введение**

Широкое применение композиционных материалов в автомобильных конструкциях различного назначения обуславливает создание более совершенных композитных структур и разработку технологических процессов для их реализации в конкретных изделиях. Стержневые композитные профили находят применение в качестве силовых и подкрепляющих элементов автомобильных конструкций, причем характер их нагружения обуславливает действие нагрузки преимущественно в осевом направлении.

Такого рода стержневые элементы изготавливаются, в большинстве своем, методом пултрузии, позволяющем получать длинномерные изделия с высокими скоростями изготовления [1]. Однако пултрудированные композитные профили, в силу однонаправленности армирования, обладают невысокими сдвиговыми и трансверсальными упругими и прочностными характеристиками и низкой прочностью при продольном сжатии, величину которых определяют параметры матрицы и адгезия между волокнами и связующим. Для устранения указанных недостатков целесообразно использовать пространственную схему армирования таких изделий, вводя один и более слоев вспомогательной трансверсальной арматуры [2]. Предложен технологический процесс роллтрузии, позволяющий успешно совместить пространственное армирование с непрерывным формованием длинномерных профилируемых стержней на основе волокнистых композитов.

Отличительными особенностями такого метода являются введение в технологический регламент операции нанесения вспомогательной арматуры, и также использование в качестве формирующего тракта приводных профилированных роликов (рис. 1). Причем, синхронизация скорости протягивания со скоростью вращения формирующих роликов позволяет значительно снизить деформативность армирующего материала и искажение его структуры в процессе формования [3].

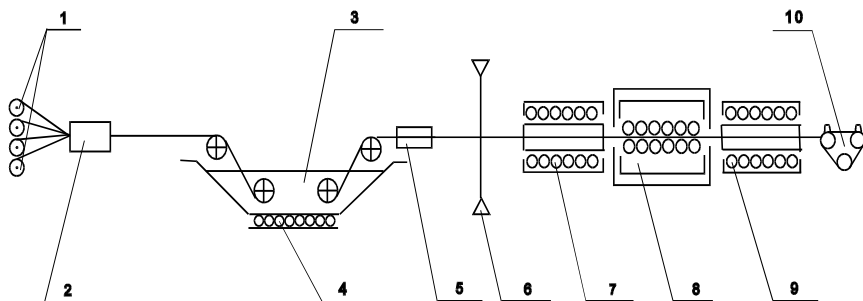


Рис. 1. Схема непрерывного технологического процесса формования профиля методом “ролтрузии”: 1 - шпулярник; 2 - распределительное устройство; 3 - пропиточная ванна; 4 - нагревательный элемент; 5 - отжимная фильера; 6 - обмоточный узел; 7 - термокамера предварительной обработки; 8 - формирующие ролики; 9 - полимеризационная термокамера; 10 - протягивающее устройство

Важнейшей стадией процесса ролтрузии наряду с нанесением вспомогательной арматуры, является прохождение пропитанного термореактивным связующим волокнистого материала через зону формования. В формирующих роликах происходит удаление излишков связующего, уплотнение армирующего наполнителя, а также отверждение связующего до степени, обеспечивающей сохранение формы профильного изделия и допустимый уровень его физико-механических характеристик.

**Целью работы** является определение оптимального соотношения термокинетических параметров ролтрузии - скоростей протяжки изделия и отверждения связующего с распределением температурных полей в зоне формования.

### Методика и результаты исследования

Для решения поставленной задачи используется одномерная термокинетическая модель ролтрузионного формования профильных стержневых изделий из волокнистых композитов, основанная на решении связанной задачи теплопроводности и теплообмена в системе профиль-

формулирующие ролики с помощью общего уравнения Дамкелера для потока тепла в одном направлении и уравнения кинетики отвержденного связующего [4,5].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \beta}{\partial t} = F(\beta) \cdot 1 - \frac{E(\beta)}{RT} ; \\ \rho C_p S \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda S \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho C_p S V \frac{\partial T}{\partial x} + \eta P (T - T_{-p}) - \\ Q_0 \rho S \frac{\partial \beta}{\partial t} = 0 \end{array} \right.$$

где  $\rho$  - плотность материала профиля;

$C_p$  - теплоёмкость материала профиля;

$S, \Pi$  - площадь и периметр поперечного сечения профиля, соответственно;

$\psi$  - коэффициент теплопроводности материала профиля;

$h$  - коэффициент теплопередачи системы профиль-среда;

$T_{CP}$  - температура среды;

$T(t)$  - температура профиля;

$t$  - время;

$Q_0$  - полный тепловой эффект реакции отверждения;

$\lambda$  - степень отверждения связующего.

Предложенная модель позволяет определить тепловой режим формового профиля, а также промежуточную и конечную степень отверждения связующего с учетом формы и размеров профилируемого изделия и скорости протягивания. В сочетании с хемореологическими диаграммами связующего, предложенная термокинетическая модель может быть использована для расчета технологических параметров процесса роллтризционного формования сложноармированных композитных профилей.

Выводы. Для проверки адекватности модели проведены экспериментальные исследования, показавшие хорошее соответствие между теоретическими и опытными данными. Образцы профильных эпоксиуглеродных стержневых изделий, имеющие внутренний слой спиральной обмотки и слой внешней оплетки органической нитью, были изготовлены на роллтризционной установке. Удельная прочность при продольном сжатии та-

ких стержней в сравнении с однонаправленными выше на 20...30 процентов, а трансверсальные характеристики – на 30...40, что позволяет говорить о перспективе такой технологии при создании элементов силового набора современных автомобилей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бичков С.А. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів / С.А. Бичков, О.В. Гайдайчук, В.С. Гайдайчук [та ін.]. - К. ІСДО: - 2005 - 406 с.
2. Коструб В.А., Герасімов Є.Ю. Расчет параметров плетельно-пултрузионного процесса получения композитных стержней для силовых конструкций автомобилей / В.А. Коструб, Є.Ю. Герасімов // Программа 66 научно- технич. конф. проф-преп. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов Белорусского нац. тех. ун-та. - Минск: БНТУ. – 2013. – С. 86-90.
3. Коструб В.А. Расчет технологических параметров плетельно-пултрузионного процесса изотопления профильных композитных стержней // Наука – образованию, производству, экономике. Материалы ІХ междунар. науч-техн. конф. Т. 1. Вид-во БНТУ, Минск. 2011. – С. 352.
4. Сумм Б.Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. - М.: Химия - 1976. - 232 с.
5. Лыков А.В. Теплообмен. / А.В. Лыков. - М.: Энергия. - 1972. - 560 с.

### ***Kostrub V.A., Verbskaya L.M. Researching of the formation process of composite cores by roltrusion method***

*Process of composite bars formation using roltrusion method has been investigated. Optimum correlation of roltrusion thermo-kinetic parameters, that is speeds of item stretching and solidification of a binder with distribution of temperature fields in a formation area have been determined.*

**Key words:** *composite material, roltrusion technical process, bar, formation, binder, polymerization.*

Коструб В.А., к.т.н., доцент Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск.

Вербская Л.М., магистр Луганского государственного университета им. В. Даля, г. Луганск.

## ТРЕБОВАНИЯ

к оформлению статей для публикации в сборнике «**Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении**»

К публикации принимаются статьи объемом **4-8 полных страниц**, материалы которых соответствуют **только научному направлению сборника**.

**Срок подачи материалов – ежегодно до 30 апреля и до 1 октября.**

Научные статьи в 1-ом экземпляре, напечатанные на лазерном (струйном) принтере, с подписями всех авторов, актами экспертизы, рецензиями и обязательно на электронном носителе информации (компакт-диск CD-R или DVD-R) передаются в адрес редакции сборника: кафедра «Материаловедение и строительство», Луганский государственный университет имени Владимира Даля, кв. Молодежный 20А, г. Луганск, 91034, а также электронной почтой по адресу: **resource.saving@gmail.com**.

**Название файла статьи:** <фамилия автора, город> (Петров\_Донецк.doc).

**Структура статьи должна иметь следующие элементы**

**На первой странице** в первой строке набирается УДК, без абзачного отступа. (выравнивание по левому краю). Шрифт Times New Roman, размер 11 пт, стиль обычный.

**Фамилии, инициалы авторов на языке текста статьи** (русском или украинском) размещаются через интервал после УДК (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полуужирный**, выравнивание - по левому краю).

**Название статьи на языке текста** набирается прописными буквами через интервал после фамилий и инициалов авторов без переносов (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полуужирный**, выравнивание - по центру).

**Фамилии, инициалы авторов на английском языке** размещаются через интервал после названия статьи на языке текста (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полуужирный**, выравнивание - по левому краю).

**Название статьи на английском языке** набирается прописными буквами через интервал без переносов (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полуужирный**, выравнивание - по центру).

**Аннотация на языке статьи не менее 8 строк** размещается через интервал после названия статьи на английском языке, шрифт Times New Roman, размер - 9 пт, стиль - обычный, выравнивание - по ширине.

**Ключевые слова** на языке статьи (не более 7 слов) размещаются с новой строки после аннотации (шрифт Times New Roman, размер - 9 пт, стиль - обычный, выравнивание - по ширине).

**Текст статьи** размещается через интервал: шрифт Times New Roman, абзацный отступ - 0,75 см, размер - 10 пт; стиль - обычный, выравнивание - по ширине с переносами. Заголовок каждого параграфа помещают с новой строки через интервал после предыдущего параграфа, абзацный отступ - 0,75 см, шрифт Times New Roman, размер - 10 пт, стиль - **полуужирный**.

1. **Введение** - постановка проблемы, задачи в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами, анализ последних публикаций (не менее 3-х статей).

2. **Цель** формулировка цели статьи (отдельный абзац с новой строки – «Целью работы является...»).

3. **Методика исследования** (или **Математическая модель**)

4. **Результаты исследований.**

5. **Выводы.**

6. **ЛИТЕРАТУРА** размещается в конце статьи через интервал после текста перед аннотациями и набирается прописными буквами (шрифт Times New Roman,

размер - 10 пт, стиль - **полуужирный**, выравнивание - по центру). Список литературных источников выполняется шрифтом Times New Roman; размер - 9 пт; стиль - обычный. Оформление ссылок на цитируемые источники должно соответствовать Государственному стандарту России. Библиографическое описание приводится на языке оригинала.

7. **Фамилии, инициалы авторов, название статьи и аннотация на английском языке** объемом не менее 12 строк размещается через 1 интервал после *списка литературы* и включает следующие аспекты содержания статьи: предмет, тему, цель работы, метод или методологию исследования, важнейшие результаты, научная новизна, практическая ценность, область применения результатов.

**Ключевые слова на английском языке** (до 7 слов) размещаются с новой строки после аннотации (шрифт Times New Roman, размер - 9 пт, стиль - *курсив*, выравнивание - по ширине).

8. **Сведения об авторах** приводятся через интервал от аннотаций: фамилия, инициалы, ученая степень, звание, должность, место работы, адрес электронной почты (шрифт Times New Roman; размер - 9 пт; стиль - обычный).

**Текст статьи** размещается на белой бумаге формата А5 (148x210 мм), ориентация – книжная со следующими полями: верхнее - 17 мм, нижнее -23 мм, левое – 17 мм, правое – 23 мм. От края до верхнего колонтитула - 0 мм, до нижнего колонтитула - 16 мм, межстрочный интервал - 1,0. Текст статьи оформляется в редакторе **Microsoft Word 2003-2016**.

*Страницы не нумеровать.*

**Формулы и символы** набираются только в редакторе формул Microsoft Equation 2.0/3.0 или MathType со следующими параметрами: стиль - математический; размеры шрифта: обычный - 10 пт; крупный индекс - 9 пт; мелкий индекс - 7 пт; крупный символ - 12 пт; мелкий символ - 8 пт. Нумерация формул - в круглых скобках с выравниванием по правому краю границ текста.

**Рисунки и таблицы** монтируются непосредственно в тексте с обтеканием сверху и снизу и помещаются в последовательности, в которой приводятся ссылки на них в статье. Подрисовочный текст, номера, названия и содержимое таблиц выполняются шрифтом Times New Roman; размер - 9 пт; стиль - обычный; интервал - 1,0.

Статьи, **не соответствующие научному направлению сборника или требованиям к оформлению статей**, редакцией не принимаются к публикации и назад не возвращаются.

Научное издание

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА  
И ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Сборник научных трудов

Ответственный за выпуск    Л.А. Рябичева  
Литературный редактор    Л.А. Рябичева  
Технический редактор    Е.В. Нагорный  
Оригинал-макет

Подписано к печати 05.06.2016 г.  
Формат 60 x 84 /16. Бумага офс. Гарнитура Times.  
Печать офсетная. Услов.печ. листов 14,3. Обл. друк. арк. 11,5.  
Тираж 100 экз. Изд.. №    . Заказ №    . Цена договорная.

Издательство  
Луганского государственного университета  
имени Владимира Даля

**Адрес издательства:** 91034, г. Луганск, кв. Молодёжный, 20а,  
**Телефон:** +38 (0642) 41-34-12. **Факс:** +38 (0642) 41-31-60.  
**E-mail:** resource.saving@gmail.com  
<http://dahlniver.ru/>