

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ЛНР

**ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**

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

Сборник научных трудов

№3 (20) 2017

Луганск 2017

Сборник включен в Перечень научных специализированных изданий ЛНР
Свидетельство о регистрации: серия № ПИ 000101 от 08.06.2017 г.

Сборник включен в Перечень рецензируемых научных изданий
Министерства образования и науки ДНР (Приказ № 464 от 02.05.2017 г.)

Сборник входит в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Рекомендовано к печати Ученым советом Луганского национального
университета имени Владимира Даля (Протокол № 10 от 27.06.2017 г.).

Редакционная коллегия:

Рябичева Л.А., д-р техн. наук, проф. (председатель редакционной коллегии), (ЛНУ им. В. Даля); Гутько Ю.И., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Яковченко А.В., д-р техн. наук, проф. (ДонНТУ, г. Донецк); Гедрович А.И., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Гальцов И.А., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля); Витренко В.А., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Мирошников В.В., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Половинка Д.В., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля); Шатова Н.А., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля); Алимов В.И., д-р техн. наук, проф. (ДонНТУ, г. Донецк); Егоров С.Н., д-р техн. наук, проф. (ЮРГПУ им. М.И. Платова, Россия); Скориков А.В., д-р техн. наук, проф. (ЮРГПУ им. М.И. Платова, Россия); Ефремов А.Н., д-р техн. наук, проф. (ДонНАСА, г. Макеевка); Назарова А.В., к-т техн. наук, доц. (ЛНАУ); Дейнека И.Г., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Малов В.А., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля); Никитин Ю.Н., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля).

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 ЛНУ им. В. Даля, 2017. – 104 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 национальный университет имени Владимира Даля, 2017.

© Vladimir Dahl Lugansk National University, 2017.

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF LPR
VLADIMIR DAHL LUGANSK NATIONAL UNIVERSITY**

**RESOURCE-SAVING
TECHNOLOGIES OF PRODUCTION
AND FORMING MATERIALS IN
MECHANICAL ENGINEERING**

Collection of scientific works

№3 (20) 2017

Lugansk 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

Сыровой Г.В.	10
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА	
Колесников А.В.	21
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ДАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЭКСТРУЗИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РАЗНОРОДНЫХ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Гедрович А.И., Бородина Е.В., Некрутенко В.В.	28
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ БОКОВЫХ СТенок ПОДВИЖНОГО СОСТАВА	
Гальцов И.А.	35
ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАКИРОВАННОЙ СТАЛИ 09Г2С+08Х18Н10Т	

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

Войтенко В.А., Войтенко Г.О.	46
ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ И ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЛАНШЕТНОГО КОМПЬЮТЕРА	
Комаров Н.В., Войтенко В.В.	53
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭХОЛОТ-ДЕФЕКТОСКОП	

Металлургия и материаловедение

Дубасов В.М., Шетилова А.А.	62
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА РАБОЧЕГО СЛОЯ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИСПОЛНЕНИЯ ЛПХНМд	

Решетняк Д.В...... 70
УСИЛЕНИЕ КУМУЛЯТИВНОГО ЭФФЕКТА ПРИ КОЛЛАПСЕ
ПОСЛЕРАЗРЯДНОЙ КАВЕРНЫ ВНЕШНИМ АКУСТИЧЕСКИМ
ПОЛЕМ

Алимов В.И., Генкузина В.О...... 79
АНИЗОТРОПИЯ ДИФфуЗИОННЫХ ПОТОКОВ ПРИ
ТВЁРДОФАЗНОМ НАУГЛЕРОЖИВАНИИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ
СТАЛИ

Строительство и архитектура

Пилавов М.В...... 88
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ
РЕЖИМОВ РАБОТЫ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ ПРИГОТОВЛЕНИЯ
ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Засько В.В...... 95
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОБАВОК ИЗ ОТХОДОВ
МЕТАЛЛООБРАБОТКИ КАК КОМПОНЕНТА
КОМПОЗИЦИОННЫХ БЕТОНОВ

Требования к оформлению статей..... 102

CONTENTS

Mechanical engineering and engineering science

Sirovoy G.V.	10
IMPROVEMENT OF QUALITY SMALL-SIZED CASES ON THE BASIS OF FUNCTION-ORIENTED PROPERTIES OF THE COMPOSITE	
Kolesnikov A.V.	21
IMPROVEMENT OF METHODS OF MEASUREMENT VALUES PRESSURE IN THE PROCESS THE PROCESS OF EXTRUSION PROCESSING HETEROGENEOUS SECONDARY POLYMERIC MATERIALS	
Gedrovich A.I., Borodina E.V., Nekrutenko V.V.	28
THE RESEARCH OF THE MOVEMENT OF THE METAL DURING WELDING OF THE SIDE WALLS OF THE ROLLING STOCK	
Galtsow I.A.	35
FORMATION OF RESIDUAL STRESSES WITH MANUAL ARC WELD OF PLASTIC STEEL 09Mn2Si + 08Cr18Ni10Ti	

Instrument making, metrology and information and measuring devices and systems

Voytenko V.A., Voytenko G.O.	46
DEVICE FOR MEASURING PHYSICAL AND TECHNICAL PROPERTIES OF COMPOSITE AND POWDER MATERIALS BASED ON TABLET COMPUTERS	
Komarov N.V., Voytenko V.V.	53
UNIVERSAL ECHO SOUNDER-FLAW DETECTOR	

Metallurgy and materials science

Dubasov V.M., Shetilova H.A.	62
RESEARCH OF INFLUENCE OF CHEMICAL ELEMENTS ON PROPERTIES OF WORKING LAYER RENTAL ROLLERS of EXECUTION BY SRCNMd	

Reshetnyak D.V. 70
AMPLIFICATION OF THE CUMULATIVE EFFECT IN THE COLLAPSE
OF THE POST-DISCHARGE CAVERN BY AN EXTERNAL ACOUSTIC
FIELD

Alimov V. I., Genkuzina V.O. 79
ANISOTROPY OF DIFFUSION IN THE SOLID STATE
CARBURIZATION OF DEFORMED STEEL

Construction and architecture

Pilavov M.V. 88
MATHEMATICAL SIMULATION NONSTATIONARY MODES OF
OPERATION BALL MILL FOR PREPARATION OF COAL-WATER
FUEL

Zasko V.V. 95
THE USE OF WASTE METALWORKING GRINDING
COMPANIES IN THE REGION AS A COMPONENT OF
COMPOSITE CONCRETES

Requirements to registration of articles 102

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И
МАШИНОВЕДЕНИЕ**

УДК 629.7; 678.5

Сыровой Г.В.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МАЛОГАБАРИТНЫХ КОРПУСОВ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТА

Sirovoy G.V.

IMPROVEMENT OF QUALITY SMALL-SIZED CASES ON THE BASIS OF FUNCTION-ORIENTED PROPERTIES OF THE COMPOSITE

Исследовано влияние функционально-ориентированных свойств композитного материала на повышение качества производства малогабаритных корпусов. Предложена математическая модель по определению деформационных констант в слоях композитного материала на основе расчетной графической программы КОМПАС 3-D и получены данные константы для различных функционально-ориентированных слоев наматываемого армирующего материала. Экспериментально подтверждены результаты расчетно-графических исследований повышения качества малогабаритных корпусов.

Ключевые слова: качество, композиционный материал, функционально-ориентированные слои, малогабаритный корпус, деформационные свойства.

Введение

С появлением новых композиционных материалов и совершенствованием технологического процесса повышаются и требования к качеству производства малогабаритных корпусов. Это обусловлено еще и тем, что увеличиваются эксплуатационные функции малогабаритных корпусов из композиционных материалов и расширяются условия их эксплуатации, при одновременном исполнении принципов компактности и массового совершенства структурных элементов [1]. Следовательно, для решения этих проблем необходимо использовать нетрадиционные свойства нового материала и реализовывать качественно новую технологию [2], и такой технологией является функционально-ориентированная композиционная технология [3].

Целью работы является исследование влияния функционально-ориентированных свойств композитного материала на повышение качества производства малогабаритных корпусов.

Методика исследования

На основе особенностей синтеза композиционных технологий [4] выделяются следующие принципы технологии намотки малогабаритного корпуса:

1. Совместимости структуры армирующего материала.
2. Единства и общности армирующего материала и матрицы.
3. Способности соединяемых композиционных материалов к гибридизации.
4. Управляемости технологическими воздействиями и свойствами армирующего материала и матрицы.
5. Действиями итерационно-рекуррентных связей технологического процесса.
6. Способности композиционной технологии к реализации качественно новых методов технологических воздействий и принципов преобразования свойств изделий.
7. Обеспечения упругих констант элементов композита и констант композита в целом.

Этот подход дает возможность определять композицию, синтезировать и корректировать композиционную технологию. При этом основанием процесса этих технологий являются принципы функционально-ориентированных технологий, промежуточные оболочки которых формируются на основе различных по значимости упругих констант элементов композита в целом.

Традиционно, при изготовлении изделий из композитного материала (КМ), изначально известны упругие константы матрицы и волокна, а также их объемное содержание в КМ. Таким образом, для расчета КМ в расчетно-графической программе КОМПАС-3D, необходимо перейти от упругих констант элементов композита к константам композита в целом.

Согласно [5] для однонаправленного композита, в зависимости от направления волокон, упругие константы рассчитываются по определенному закону. Условно принимаем направление вдоль волокон за 1, а поперек – 2.

Модуль упругости вдоль волокон рассчитывается по формуле:

$$E_1 = E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta), \quad (1)$$

- где
- E_B – модуль упругости волокна;
 - Θ – объемное содержание волокна;
 - E_M – модуль упругости матрицы.

Модуль упругости поперек волокон рассчитывается по формуле

$$E_2 = \frac{E_B \cdot E_M [E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta)]}{[E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta)] \cdot [E_M \cdot \Theta + E_B \cdot (1 - \Theta)] - \Theta \cdot (1 - \Theta) \cdot (E_B \cdot \mu_M - E_M \cdot \mu_B)^2}. \quad (2)$$

Коэффициент Пуассона композита при растяжении вдоль волокон находится по формуле

$$\mu_{12} = \mu_B \cdot \Theta + \mu_M \cdot (1 - \Theta), \quad (3)$$

где μ_B – коэффициент Пуассона волокна;
 μ_M – коэффициент Пуассона матрицы.

Коэффициент Пуассона композита поперек волокон находится по формуле

$$\mu_{21} = \frac{E_B \cdot E_M \cdot [\mu_B \cdot \Theta + \mu_M \cdot (1 - \Theta)]}{[E_B \cdot \Theta + E_M \cdot (1 - \Theta)] \cdot [E_M \cdot \Theta + E_B \cdot (1 - \Theta)] - \Theta \cdot (1 - \Theta) \cdot (E_B \cdot \mu_M - E_M \cdot \mu_B)^2}. \quad (4)$$

Модуль сдвига в плоскости со свойствами изотропной модели материала зависит от модуля упругости и коэффициента Пуассона и определяется по формуле:

$$G_{ij} = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \mu_{ij})}, \quad (5)$$

где E_i – модуль упругости в направлении i ;
 μ_{ij} – коэффициент Пуассона в направлении " j " при нагружении в направлении " i ".

Модуль упругости на сдвиг является одной из самых противоречивых упругих констант КМ как при ее теоретическом определении, так и в экспериментах, потому что очень сложно реализовать чистый сдвиг в его теоретической трактовке. По этой причине рассмотрим две модели деформирования элемента КМ при сдвиге (рис. 1).

В первом случае (рис. 1, а) сдвиг элемента КМ между двумя жесткими плитами в направлении, перпендикулярном волокнам, обеспечивает равенство сдвиговых деформаций волокна и матрицы. Во втором случае (рис. 1, б) сдвиг элемента параллельно волокнам означает, что напряжения в волокне и матрице одинаковы.

Экспериментальные значения модуля сдвига находятся между результатами, полученными в первом и во втором случае [6].

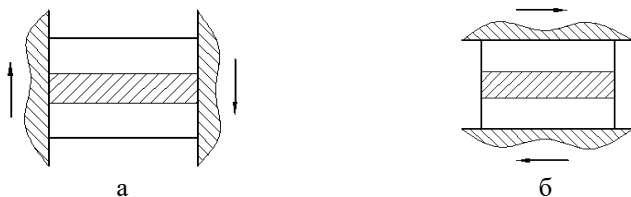


Рис. 1. Деформирование КМ при сдвиге:

а - равенство сдвиговых деформаций, б - равенство касательных напряжений

Таким образом, модуль сдвига во всех плоскостях, кроме плоскости со свойствами изотропной модели материала, берется как среднее значение между модулем сдвига, рассчитанным исходя из равенства сдвиговых деформаций и модулем сдвига, рассчитанным исходя из равенства касательных напряжений

$$G_{12} = \frac{G_{12}^D + G_{12}^H}{2}, \quad (6)$$

где G_{12}^D – модуль сдвига равенства сдвиговых деформаций;
 G_{12}^H – модуль сдвига равенства касательных напряжений;

$$G_{12}^D = G_B \cdot \Theta + G_M \cdot (1 - \Theta), \quad (7)$$

$$G_{12}^H = \frac{G_B \cdot G_M}{G_M \cdot \Theta + G_B \cdot (1 - \Theta)}, \quad (8)$$

где G_B – модуль сдвига волокна;
 G_M – модуль сдвига матрицы.

Модули сдвига волокна и матрицы в свою очередь определяются по формулам:

$$G_B = \frac{E_B}{2 \cdot (1 + \mu_B)}, \quad (9)$$

$$G_M = \frac{E_M}{2 \cdot (1 + \mu_M)} \quad (10)$$

Результаты исследований

Для проверки правильности подхода при выборе методики расчета был рассчитан баллон, условно армированный слоем $[0^\circ]$ и $[90^\circ]$ относительно оси Z. По деформации баллона, нагруженного внутренним давлением, был проведен анализ и наглядно видна работа слоев.

Геометрические параметры малогабаритного корпуса внутреннего давления представлены на рис. 2.

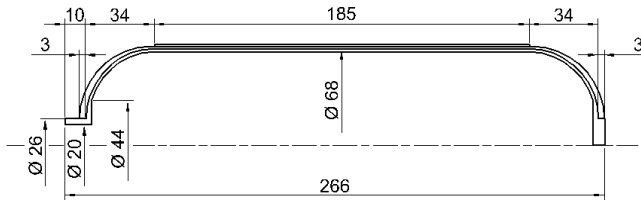


Рис. 2. Геометрические параметры модели малогабаритного корпуса внутреннего давления

Модель намотки малогабаритного корпуса внутреннего давления представлена на рис. 3, а исходные данные по намотке баллона приведены в табл. 1.



Рис. 3. Функционально-ориентированные слои малогабаритного корпуса

Лейнер выполнен из нержавеющей стали 12X18Н10Т, упругие константы лейнера и компонентов КМ сведены в табл. 2 и 3.

Проведя вычисления по вышеизложенным формулам (6-10), в зависимости от направления армирования, были получены численные значения упругих констант КМ (табл. 4) и составлены (табл. 5, 6) для упругих констант продольного и кольцевого слоя, задаваемых для расчетных компьютерных систем.

Баллон рассчитан в КОМПАС-3D методом конечных элементов. Расчет лейнера проводился в декартовой системе координат (СК), цилиндрической

части слоя $[0^\circ]$ и слой $[90^\circ]$ в цилиндрической СК, а околополюсных частей слоя $[0^\circ]$ в сферических СК.

Т а б л и ц а 1.

Геометрические параметры малогабаритного корпуса, используемого при расчетах

Параметр	Обозначение	Значение, мм
Толщина лайнера	h_l	1,5
Толщина слоя 0°	h_0	1
Толщина слоя 90°	h_{90}	1

Т а б л и ц а 2.

Упругие константы лайнера

Физическая величина	Обозначение	Значение
Модуль упругости, МПа	E	$2,1 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	μ	0,3

Т а б л и ц а 3

Упругие константы компонентов КМ

Параметр	Обозначение	Значение
Модуль упругости волокна, МПа	E_v	90000
Коэффициент Пуассона волокна	μ_v	0,28
Модуль сдвига волокна, МПа	G_v	35156
Модуль упругости матрицы, МПа	E_m	4000
Коэффициент Пуассона матрицы	μ_m	0,3
Модуль сдвига матрицы, МПа	G_m	1538
Объемное содержание волокна в слое	Θ	0,6

В программном комплексе КОМПАС-3D методом конечных элементов модель лайнера малогабаритного корпуса (рис. 4), автоматически разбивается на элементы, которые образуют расчетную сетку (рис. 5).

Т а б л и ц а 4.

Упругие константы КМ в зависимости от направления армирования

Параметр	Обозначение	Значение
Модуль упругости вдоль волокон, МПа	E_1	55600
Модуль упругости поперек волокон, МПа	E_2	10138
Коэффициент Пуассона при нагружении вдоль волокон	μ_{12}	0,288
Коэффициент Пуассона при нагружении поперек волокон	μ_{21}	0,053
Модуль сдвига плоскости со свойствами изотропной модели материала (XY), МПа	G_{XY}	5069
Модуль сдвига плоскости параллельной оси симметрии, МПа	G_{12}	12659

Т а б л и ц а 5.

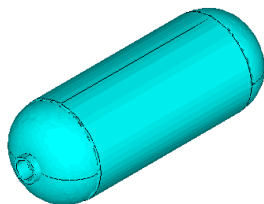
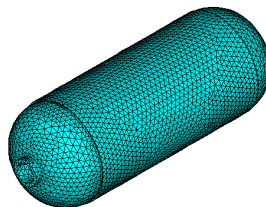
Упругие константы продольного слоя

Физическая величина	Обозначение	Расчетная величина	Значение
Модуль упругости, МПа	E_x	E_2	10138
	E_y		10138
	E_z	E_1	55600
Коэффициент Пуассона	μ_{xy}	–	0
	μ_{yz}	μ_{21}	0,053
	μ_{xz}		0,053
Модуль сдвига, МПа	G_{xy}	G_{xy}	5069
	G_{yz}	G_{12}	12659
	G_{xz}		12659

Т а б л и ц а 6.

Упругие константы кольцевого слоя

Физическая величина	Обозначение	Расчетная величина	Значение
Модуль упругости, МПа	E_x	E_2	10138
	E_y	E_1	55600
	E_z	E_2	10138
Коэффициент Пуассона	μ_{xy}	μ_{21}	0,053
	μ_{yz}	μ_{12}	0,288
	μ_{xz}	–	0
Модуль сдвига, МПа	G_{xy}	G_{12}	12659
	G_{yz}		12659
	G_{xz}	G_{xy}	5069

Рис. 4. Модель лайнера
малогабаритного корпусаРис. 5. Расчетная сетка из 12560
элементов

Результаты расчета малогабаритного корпуса, нагруженного внутренним давлением $P = 10$ МПа приведены на (рис. 6–8). Для наглядности деформация увеличена в 200 раз, единица измерения напряжения – МПа.

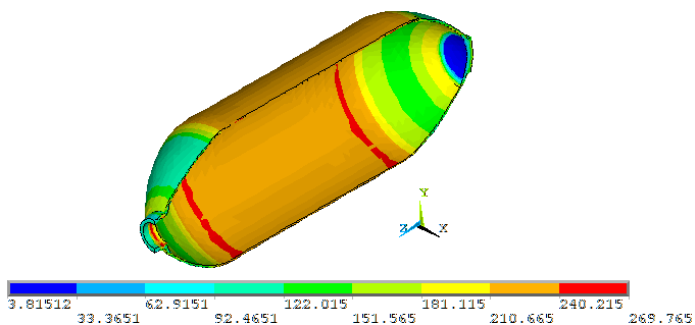


Рис. 6. Эквивалентные напряжения стенки лейнера (вид в разрезе)

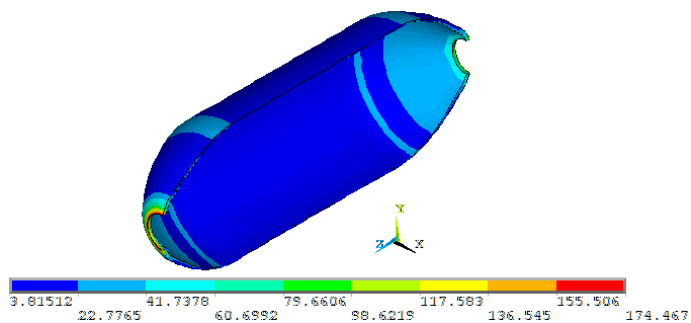


Рис. 7. Эквивалентные напряжения намотанного спирального слоя $[0^\circ]$.

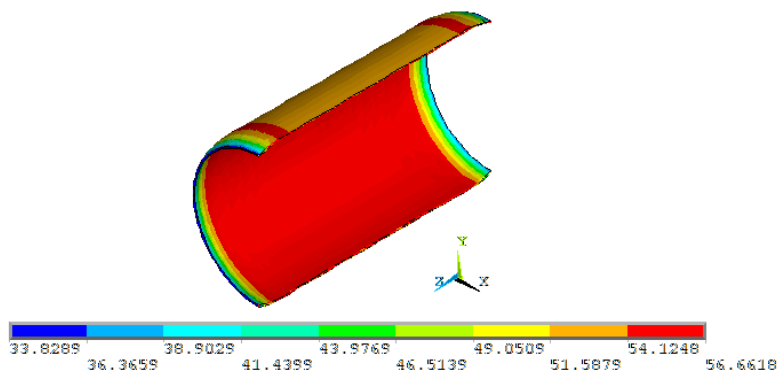


Рис. 8. Эквивалентные напряжения кольцевого слоя $[90^\circ]$.

После нагружения баллона внутренним давлением $P = 10$ МПа наглядно видна работа слоев и лейнера. Максимальные напряжения возникают в лейнере в районе перехода его цилиндрической части в сферическую и составляют 270 МПа. Напряжения в слоях $[0^\circ]$ и $[90^\circ]$ составляют 23 МПа и 57 МПа соответственно.

Проведенный расчет позволяет оптимизировать конструкцию исходя из допускаемых напряжений слоев КМ и лейнера.

Для экспериментальной проверки были изготовлены малогабаритные корпуса емкостью 0,7 л под рабочее давление $P_p=29,4$ МПа с лейнером из стали 12Х18Н10Т. Малогабаритный корпус предназначен для статического кратковременного нагружения и работы при циклических нагрузках в течение $N=2000$ циклов. Коэффициент запаса $n=2,6$.



Рис. 9. Малогабаритные корпуса после испытаний

Намотка кольцевых и спиральных слоев осуществлялась жгутом ЖСВМ-58,8(300)x17-1000-4 на связующем ЭДТ-10 одним семейством нитей со средним углом армирования $\varphi_{opt}=19,36^\circ$.

Расчетные значения толщин функционально-ориентированных кольцевых и спиральных слоев при значениях $E_c=E_k=1,25 \times 10^5$ МПа, $E_l=2,0 \times 10^5$ МПа, $\mu=0,275$ составило $h_{k opt}=1,3$ мм, $h_{c opt}=0,7$ мм.

Этим толщинам АМ соответствовали следующие деформации:

$$\varepsilon_{\theta}^M=0,195\%, \varepsilon_{\sigma}^M=0,079\%, \varepsilon_{\theta\theta}^M=0,211\% < [\varepsilon] = 0,25\%.$$

Для данного материала лейнера полученные эквивалентные деформации должны обеспечивать заданный ресурс при циклических нагрузках.

Все малогабаритные корпуса были нагружены водой до давления 45,0 МПа с замером окружной и осевой относительных деформаций. Измерения проводились в разных сечениях на цилиндрической части корпуса. Осредненные значения относительных деформаций по малогабаритным корпусам при $P_p=30$ МПа равны $\varepsilon_{\theta}^p=0,178\%$, $\varepsilon_{\sigma}^p=0,086\%$, $\varepsilon_{\theta\theta}^p=0,198\%$.

После замера деформаций один корпус был поставлен на ресурсные испытания при переменном давлении от 3,0 до 33,0 МПа с периодом нагружения четыре секунды. При 4500 циклах нагружения произошла потеря герметичности из-за образования усталостной трещины в продольном сварочном шве цилиндра лейнера малогабаритного корпуса. Оставшиеся корпуса были разрушены при статическом нагружении водой давлением 93,0 и 90,0 МПа. Таким образом коэффициент запаса прочности составил $n^p=3,06-3,16$, что соответственно увеличило качество производства малогабаритных корпусов.

Выводы

1. Зная модули упругости и коэффициенты Пуассона волокна и матрицы, а также объемное содержание волокна в КМ, можно рассчитать в программном комплексе КОМПАС -3D упругие константы полного слоя в целом.

2. Проведенные экспериментальные исследования малогабаритных корпусов, подтвердили рассчитанные значения, методом конечных элементов, полученные значения деформаций функционально-ориентированных слоев композита с погрешностью 7 %.

3. Использование в технологическом процессе функционально-ориентированных свойства композита позволило поднять качество производства малогабаритных корпусов на 25%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физико-технологические основы методов обработки / Под ред. А.П. Бабичева. Ростов н/Д : Феникс, 2006. 409 с.
2. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. Донецк : ДонНТУ, 2009. 346 с.
3. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. 416 с.
4. Михайлов А.Н., Михайлова Е.А., Михайлов Д.А. Основы синтеза композиционных технологий машиностроения // Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». № 713. Львів : НУ «Львівська політехніка політехніка Політехніка», 2011. С. 23-31.
5. Гагауз, Ф.М. Гуменников В.В. Моделирование структурных параметров композита в соединительном элементе // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Х. : 2013. Вып. 2 (74). С. 46-53.
6. Харченко М.Е. Приближенные зависимости между пределами прочности полимерных композиционных материалов при сжатии, растяжении и изгибе // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». - Х. : 2013. Вып. 2 (74). С. 54–63.

Sirovoy G.V. Improvement of quality small-sized cases on the basis of function-oriented properties of the composite

It is investigated influences of function-oriented properties of a composite material on improvement of quality of manufacture of small-sized cases. The mathematical model by definition of deformation constants in layers of a composite material on the basis of the settlement graphic program the COMPASS 3-D is offered and the given constants for various function-oriented layers of a reeled up reinforcing material are obtained. Results of settlement-graphic researches of improvement of quality of small-sized cases are experimentally confirmed.

Keywords: *quality, composite material, function-oriented layers, the small-sized case, deformation properties.*

Сыровой Геннадий Владимирович - старший преподаватель кафедры станки, инструменты и инженерная графика Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: малогабаритные корпуса на основе композиционных материалов.

e-mail.grafitos62@gmail.com

Sirovoy Gennady Vladimirovich - senior lecturer of the machines, tools and engineering graphics Department, Vladimir Dahl Luhansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: small-scale body based on composite materials.

e-mail.grafitos62@gmail.com

*Статья поступила
27 сентября 2017 г.
© Сыровой Г.В., 2017*

Колесников А.В.

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ
ВЕЛИЧИНЫ ДАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ
ПРОЦЕССЕ ЭКСТРУЗИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
РАЗНОРОДНЫХ ВТОРИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Kolesnikov A.V.

**IMPROVEMENT OF METHODS OF MEASUREMENT
VALUES PRESSURE IN THE PROCESS THE PROCESS OF
EXTRUSION PROCESSING HETEROGENEOUS
SECONDARY POLYMERIC MATERIALS**

Представлены основные цели, которые могут быть достигнуты за счет точного измерения давления, развиваемого экструдером при переработке разнородных вторичных полимерных материалов. К ним относятся более точное проектирование экструзионных машин, уточнение и проверка адекватности математических моделей расчета рабочих процессов экструзии, оперативная защита привода экструдера и экструзионной головки от избыточного давления. Первым предлагаемым методом измерения давления, развиваемого экструдером, является определение степени деформации патрубка экструдера. Данный метод воплощается в виде датчика давления, реализованного на основе магнитометрического преобразователя, представляющего собой кольцевой электромагнит и феррозондовый магнитометр. Вторым методом является измерение реакции упорного подшипника экструдера, который реализуется в виде магнитоупругого преобразователя. Третьим методом является измерение силы тока якоря двигателя постоянного тока экструдера и пересчета данного значения в комплексе с другими параметрами в давление, развиваемое экструдером. Даны рекомендации по использованию предложенных методов измерения давления в рабочем процессе экструзии.

Ключевые слова: экструдер, разнородные вторичные полимерные материалы, давление, деформация патрубка, магнитометрический преобразователь, электромагнит, магнитометр, реакция упорного подшипника, магнитоупругий преобразователь, сила тока якоря двигателя постоянного тока.

Введение

В настоящее время существующие технологические схемы переработки разнородных отходов полимерных материалов не позволяют эффек-

тивно и оперативно влиять на качество готового изделия из вторичных полимеров [1-5]. Это обусловлено общим упрощенным двустадийным подходом к решению сложной проблемы подготовки однородной смеси из отходов полимерных материалов различного типа и ее последующей переработки, отсутствием совершенных конструкций экструзионного оборудования, способного перерабатывать смеси из разнородных отходов полимеров и автоматизированных систем управления всем технологическим процессом, базирующихся на новых принципах и методах управления, современных компьютерных средствах управления [6-8].

Представляется необходимым развить и дополнить эти исследования с учетом существующих достижений в области обработки полимерных материалов давлением, конструирования, алгоритмизации, новых требований к технологическим функциям экструзионного оборудования.

Одной из интересных научных задач, требующих решения в рамках озвученной проблемы, является измерение давления, развиваемого в процессе экструзионной переработки. Точное измерение данной величины позволит повысить эффективность проектирования технологического процесса и оборудования, функционирования системы управления, а также повысить качество производимых изделий с использованием вторичных материалов.

Целью работы является предложение эффективных методов контроля и измерения величины давления, развиваемого экструдером при переработке вторичных разнородных полимерных материалов, что позволит повысить качество управления технологическим процессом обработки давлением.

Методика исследования: Теоретические исследования выполнены с использованием законов движения при ламинарном течении, гидродинамики расплавов и растворов полимеров. Применены косвенно-бесконтактные методы измерения величины давления: измерение давления по величине деформации патрубка установки, по реакции упорного подшипника экструдера, пересчет по значению силы тока якоря двигателя постоянного тока экструдера.

Измерение давления, развиваемого экструдером, (или противодействия со стороны экструзионной головки) необходимо производить с расчетом на проектирование экструзионных машин. Механическая часть экструдера сравнительно проста, однако аналитическое определение перепада давления в экструзионной головке является достаточно сложным и нами не обнаружены публикации, освещающие погрешность такого расчета. При расчете мощности привода экструдера в процессах экструзии необходимо рассчитать давление, которое должен развивать экструдер при продавли-

вании полимерного расплава через головку. В то же время точный расчет противодавления в каналах экструзионной головки необходим для оптимального конструирования экструзионной установки и определения технологических режимов. Наличие датчика давления позволит произвести исследования по выявлению зависимостей $P=f(N)$, $P=f(T)$ для различных полимеров, Результаты которых могут использоваться при последующем проектировании аналогичных машин.

Уравнения, применяемые для описания реологии полимеров также имеют погрешность. Практически не существует методик, определяющих изменение реологических характеристик в зависимости от кратности переработки полимера. Имеется необходимость защиты электродвигателя экструдера и его вращающихся частей от большого момента сопротивления, вызванного избыточным давлением, а также –экструзионной головки от избыточного давления. Эти факторы отражаются на адекватности моделирования процессов экструзии и определении технологических параметров процесса [9-10].

Таким образом, указанные причины измерения и контроля давления в экструдере являются достаточно весомыми. Приведенные цели доказывают необходимость измерения давления, развиваемого экструдером в процессе экструзии.

Давление во всех системах измеряется косвенно. Методы контроля, используемые для жидкостей: гидростатические, мембранные, в данном случае неприемлемы. Ввиду практической невозможности применения гидростатических методов из-за высоких величин давления, конструктивной невозможности и перехода вязкотекучего полимера в твердое состояние при уменьшении температуры во время отключения установки. Контактные мембранные методы неприемлемы из-за конструктивных соображений и, снова, перехода полимера из одного состояния в другое. Существенное неудобство также возникает от высокой температуры полимера в расплавленном состоянии (до 200 °С).

Из перечисленных ограничений необходимо сделать вывод о том, что величину давления, развиваемого экструдером необходимо измерять косвенно и бесконтактно. Кроме того целесообразно ориентироваться на электрический сигнал для передачи электронную систему управления.

Для расплавленного полимера под давлением, т.е. на выходе из экструдера, справедлив закон Паскаля: “Внешнее давление на жидкость или газ передается во все стороны равномерно”. Этот постулат необходимо положить в основу косвенно-бесконтактных методов измерения давления экструдера.

При продавливании расплава через каналы головки в следствии значительного гидравлического сопротивления каналов и высокой вязкости материала на входе в головку (т.е. после шнека) развивается давление, до-

стигающее иногда 40 МПа. Это давление воздействует на подводный патрубков (между экструдером и головкой). Давление пластика обеспечивается соответствующим крутящим моментом двигателя экструдера, которому пропорциональна сила тока якоря двигателя постоянного тока экструдера. Вследствие давления после шнека возникает значительное осевое усилие, действующее на шнек и стремящееся переместить его к двигателю. Это усилие со шнека передается на втулку и далее – на упорный подшипник, с него на крышку и дальше через болтовые соединения на основание установки.

Исходя из отмеченного действия давления экструдера можно выделить следующие косвенно-бесконтактные методы его измерения:

- измерение деформации патрубка между экструдером и экструзионной головкой;
- изменение осевого усилия;
- измерение силы тока якоря двигателя постоянного тока.

Рассмотрим возможности практической реализации каждого из предложенных методов измерения.

Один из методов измерения давления (до 50 МПа) при повышенной температуре (до 473 К) – косвенный метод измерения давления по степени деформации конструктивного элемента установки, например, ее патрубка, которая связана с величиной давления, развиваемого экструдером.

Достаточно высокие метрологические характеристики имеет датчик давления, реализованный на основе магнитометрического преобразователя, представляющего собой кольцевой электромагнит и феррозондовый магнитометр.

Принцип измерения давления состоит в следующем: после нанесения на ферромагнитный патрубок магнитной метки с помощью приставного электромагнита, феррозондовым преобразователем, размещенным вблизи поверхности патрубка, измеряется горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля, которая пропорциональна величине прогиба стенки патрубка.

Вторым косвенным методом является перерасчет значения давления экструдера по измеренной реакции упорного подшипника экструдера. Цепь передачи осевого усилия на шнек, образуемого в результате давления на выходе из экструдера, следующая: шнек → упорная втулка → подвижное кольцо упорного подшипника → неподвижное кольцо упорного подшипника → крышка → болтовое соединение крышки с корпусом → корпус → основание. Особенности съема усилия: невозможно разорвать приведенную цепь, т.к. это приведет к нарушению конструктивной целостности механизма; нельзя снять усилие параллельно по конструктивным соображениям; ввести в цепь какой-либо упругий элемент в виде мембраны па-

раллельно также нет возможности, т.к. конструкция не дает возможности осевым перемещениям.

Исходя из перечисленного выше, можно сделать вывод о том, что для измерения осевого усилия необходимо вклинить в цепь передачи усилия упругий жесткий элемент, который служил бы и в качестве датчика осевого усилия, и в качестве жесткого звена в цепи передачи осевого усилия, т.е. это звено должно воспринимать усилие, реагировать на него и передавать его.

Подобными характеристиками обладают магнитоупругие преобразователи.

Принцип действия магнитоупругого преобразователя основан на использовании магнитоупругого эффекта, сущность которого заключается в изменении магнитной проницаемости и других магнитных свойств ферромагнитного тела под действием механических упругих деформаций.

Зависимость этих свойств от деформаций можно показать в виде зависимостей изменения магнитной проницаемости от напряжений и гистерезисных кривых для различных напряжений.

Магнитоупругий преобразователь спроектирован для восприятия нагрузки от неподвижного кольца упорного подшипника, реакции на нее и передачи на крышку экструдера.

Третьим косвенным методом является перерасчет значения давления экструдера по измеренной силе тока якоря двигателя постоянного тока экструдера. Увеличение противодавления в головке при экструзии вызывает увеличение давления, развиваемого экструдером за счет увеличения крутящего момента, развиваемого двигателем постоянного тока экструдера, что вызывает увеличение тока якоря двигателя, а, следовательно, потребляемой мощности из сети.

Измерение силы тока якоря двигателя постоянного тока экструдера является достаточно заманчивым решением проблемы контроля давления, т.к. при этом отпадает необходимость в использовании преобразователя ввиду того, что сигнал о давлении уже является электрической величиной, при подачи которого в электронную систему управления его необходимо лишь понизить.

Необходимо лишь вывести зависимость выходной величины – тока от входной величины – давления. Поиск зависимости базируется на уравнении баланса мощностей: производимой и потребляемой экструдером, с дальнейшим переходом от момента на валу шнека машины к силе тока двигателя постоянного тока экструдера. Полученная зависимость, для исследуемой машины, имеет следующий вид:

$$P = \frac{CE \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \cdot \eta_{\text{экс}} \cdot \pi}{5,61 \cdot 10^{-5}} - 7,5 \cdot 10^4 \cdot m_0 \cdot e^{-0,01(T-T_0)} \cdot (31,416 \cdot N)^n, \quad (1)$$

где P – давление, развиваемое экструдером;
 CE – константа двигателя постоянного тока;
 Φ – магнитный поток возбуждения;
 $\eta_{\text{экс}}$ – к.п.д. экструдера;
 $I_{\text{я}}$ – ток якоря двигателя постоянного тока;
 m_0 – константа вязкости;
 T_0 – температура измерения константы вязкости;
 T – температура расплава;
 n – показатель текучести;
 N – частота вращения двигателя.

Зависимость достаточно сложна, но при централизованной системе управления параметры N , $I_{\text{я}}$, T будет просто необходимо контролировать для целей контроля и управления, т.е. они будут известны, остальные параметры постоянны при следующих допущениях: постоянстве $\eta_{\text{экс}}$ при достаточно больших значениях давления; постоянстве Φ , т.е. при условии, что двигатель постоянного тока экструдера имеет независимое возбуждение.

Выводы

Описанные выше методы контроля могут в равной степени использоваться при контроле давления в экструзионных машинах, однако существуют определенные рекомендации. Измерение силы тока якоря двигателя постоянного тока экструдера возможен при использовании в централизованной микропроцессорной системе управления, ввиду сложностей расчета. Измерение реакции подшипника при внедрении требует существенных изменений в конструкции крышки и корпуса; приемлемо лишь при создании новых машин в промышленном производстве. Измерение деформации патрубка экструдера возможно использовать при доработки существующей модели под контроль давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rauwendaal C. Melting, "Theory for Temperature-Dependent Fluids, Exact Analytical Solution for Power Law Fluids," Adv. Polym. Techn., no. 11, pp. 19-25, 1992.
2. Rauwendaal C., Ingen Housz J.F., Journal of Reinforced Plastics and Composites, no. 9, pp. 583-601, 1990.
3. Быстров Г. А., Гальперин В. М., Титов Б. П., Обезвреживание и утилизация отходов в производстве пластмасс. Ленинград, 1982.
4. Дядичев В.В., Локотш Б.Н., Леваничев В.В., Моделирование процессов соэкструзии. Луганск, 1998.

5. Дядичев В.В., Переработка отходов полимерных материалов методом соэкструзии. Луганск, 2003.
6. Дядичев В.В., Экструзия вторичных полимеров. Луганск, 2003.
7. Каган Д. Ф., Гуль В. Е., Самарина Л. Д., Многослойные и комбинированные пленочные материалы. Москва, 1989.
8. Калиновская Г. Д., Пути переработки отходов слонстых пластиков, Ленинград, 1997.
9. P. Reitemeyer, "Coextrusions werkzeuge zum Herstellen von Flachfolien fur den Verpackung sbereich," Kunststoffe, 78, no. 5, pp. 395-397, 1988.
10. F.R. Nissel, "Split barrier and modules feed block systems," Coextrusion V, SPE Regional Technical Conference, Arlington, Oct. 1989.

Kolesnikov A.V. Improvement of methods of measurement values pressure in the process the process of extrusion processing heterogeneous secondary polymeric materials

In the scientific article the main goals that may be achieved by accurate measurement of pressure, developed by the extruder during processing secondary dissimilar polymeric materials. These include a more precise design of extrusion machines, specification and verification of the adequacy of mathematical models for calculating the working extrusion processes, operational protection of the extruder drive and extrusion die from excessive pressure. First, the proposed method of measuring the pressure, developed by the extruder, is to determine the degree of deformation of the extruder nozzle. This method is embodied as a pressure sensor, a magnetometric implemented based transducer is an annular electromagnet and a fluxgate magnetometer. A second method is to measure the reaction extruder thrust bearing, which is realized in the form of a magnetoelastic transducer. The third method is to measure the amperage DC extruder motor armature current and the conversion of values in combination with other parameters in the pressure developed by the extruder. The paper presents the recommendations for the use proposed by measuring the pressure in the working methods of the extrusion process.

Keywords: *extruder, diverse secondary polymeric materials, pressure, nozzle deformation magniometrically converter solenoid, a magnetometer, a thrust bearing reaction magnetoelastic transducer, force DC motor armature current.*

Колесников Андрей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: экструзионная переработка вторичных разнородных полимерных материалов.

e-mail: angevkav@mail.ru

Kolesnikov Andrei Valerevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies of the Luhansk National University named after Vladimir Dal, Lugansk. Scientific interests: extrusion processing of secondary heterogeneous polymeric materials.

e-mail: angevkav@mail.ru

*Статья поступила
28 сентября 2017 г.*

УДК 621.791.927

Гедрович А.И., Бородина Е.В., Некрутенко В.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ БОКОВЫХ СТЕНОК ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Gedrovich A.I., Borodina E.V., Nekrutenko V.V.

THE RESEARCH OF THE MOVEMENT OF THE METAL DURING WELDING OF THE SIDE WALLS OF THE ROLLING STOCK

Приведены результаты экспериментальных исследований деформаций тонколистовых элементов боковых стенок тонколистовых вагонов подвижного состава. Показаны графики деформаций гофрированной и плоской обшивок после приварки балок жесткости. Разработана технология сборки и сварки, которая обеспечивает снижение деформаций и перемещений до уровней, установленных технологическими условиями на изготовление конструкций. Наблюдаются максимальные перемещения, превышающие допустимые в 4-5 раза, на плоских обшивках.

Ключевые слова: тонколистовой металл, сварка, деформации, боковая стенка, гофра.

Введение

При изготовлении сварных конструкций возникают остаточные деформации и напряжения, оказывающие нежелательное воздействие на работоспособность, и ухудшают товарный вид изделия [1]. Поэтому повышение точности изготовления сварной конструкции представляет собой одну из важнейших проблем [2]. Наличие остаточных сварочных деформаций и напряжений в конструкциях затрудняет и ограничивает использование сварки особенно при изготовлении тонколистовых бескаркасных элементов конструкций. К таким конструкциям относятся боковые стенки и крышки тепловозов 2ТЭ126 и 2ТЭ121, трамваев, пассажирских вагонов.

Боковые стенки тепловозов представляют собой тонколистовые бескаркасные конструкции длиной 15650 мм и шириной 2370 мм. Элементы обшивок боковых стенок тепловозов изготавливают из плоских и зигованных листов толщиной 2 мм, имеющих оконные проемы, различные по конфигурации и размеру [3]. Многочисленные сварные швы с различной

формой и протяженностью затрудняют возможность теоретического определения закономерностей образования деформаций, потери устойчивости боковых стенок тепловозов. Деформации плоских листов достигают 17 мм при допустимой по ТУ величине 6 мм. К сожалению, на такой крупногабаритной металлоконструкции при разработке технологического процесса не удастся полностью исключить появление сварочных деформаций, напряжений и перемещений.

Целью работы является исследование деформационных процессов, протекающих при сварке в конструкции.

Методика исследования

Исследовали волнистость обшивок, большие значения которой ухудшают товарный вид конструкции и служебные характеристики. Волнистость измеряли по длине металлоконструкции на базе 1000 мм ($L=1$ м). Для измерения волнистости обшивок боковой стенки тепловоза на базе 1 м разработан профилометр [4] (рис. 1). Профилометр состоит из основания 1, опирающегося на подвижные опоры 2, и датчика перемещения 4 с индуктивным чувствительным элементом модели 223, преобразующего линейные перемещения измерительного наконечника 3 в пропорциональное ему аналоговое напряжение. Сигналы от датчика перемещений регистрировались быстродействующим самопишущим прибором Н 338-1П.

Для определения вклада каждой составляющей от технологических операций в общий уровень деформаций измерения волнистости (перемещений) обшивки проводились на следующих этапах: заготовительном, после сборки обшивок, после сварки элементов жесткости, после полного изготовления боковой стенки и после правки обшивки.

Измерение волнистости обшивки на всех этапах производилось на гофрированном участке между Z- профилями, а на плоском участке - под и над оконными проемами. Профилометр перемещался с постоянной скоростью в продольном направлении боковой стенки конструкции.

Предупреждение деформаций боковых стенок тепловоза затруднено, что вызвано спецификой конструкции. Элементы обшивки боковых стенок при незначительной величине поперечной жесткости имеют протяженность свыше десяти метров, в их составе сложные по конструкции оконные проемы и гофры.

Результаты исследований

Успешное применение того или иного способа устранения деформаций предполагает знание величины и характера распределения перемещений поверхности боковой стенки. Поисковые исследования при изготовлении боковых стенок тепловозов показали, что деформации элементов, и в

частности, перемещения из плоскости возникают практически на всех этапах изготовления боковых стенок.

Для определения вклада каждой технологической операции изготовления боковой стенки тепловоза в общий уровень её деформации волнистости наружной обшивки проводилось после транспортировки и обшивкам, прихватывают балки жесткости, что приводит к уменьшению деформаций гофрированной обшивки до 1.5мм и увеличению деформаций плоских укладки листов на плиты сборочно-сварочного стенда, после сборки и прихватки всех листов наружной обшивки, после сборки и прихватки элементов жесткости и листами обшивки, после полного изготовления боковой стенки и её транспортировки.

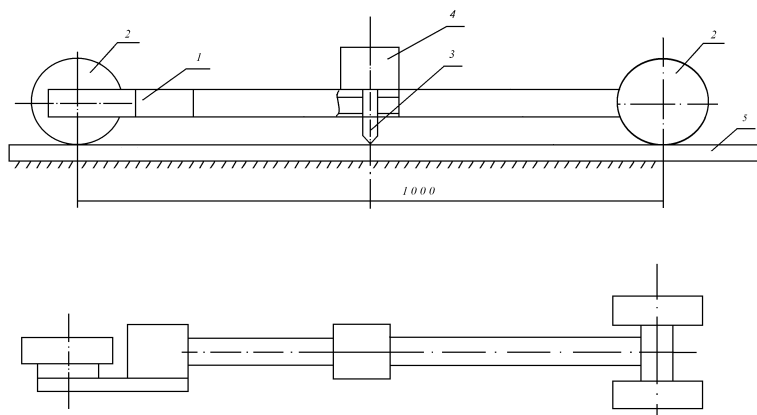


Рис. 1. Устройство для измерения волнистости обшивок

Гофрированные обшивки после транспортировки имеют деформации до 5 мм, а в отдельных местах до 12 мм на базе 1м (рис. 2, кривая 1). Плоские наружные обшивки после транспортировки имеют деформации до 1.5 мм (рис. 3, рис. 4, кривая 1). После прихватки всех листов между собой к гофрированным обшивкам до 1.5 мм (рис. 2, рис. 3 кривая 2). Это объясняется перераспределением деформаций в плоские обшивки и гофрированных в процессе выравнивания последних балками жесткости, поскольку все обшивки перед этим уже прихвачены между собой.

Деформации гофрированной и плоской обшивок после приварки балок жесткости практически не увеличиваются, только происходит их перераспределение по длине обшивок.

Сварка обечайки с плоскими наружными обшивками вызывает увеличение деформаций плоских обшивок до 15 мм по всей длине обшивок (рис. 3, кривая 3), а гофрированных обшивок до 3 мм (рис 2, кривая 3). Только на отдельных участках гофрированной обшивки наблюдаются пики деформаций протяженностью 100-150 мм и амплитудой до 6 мм.

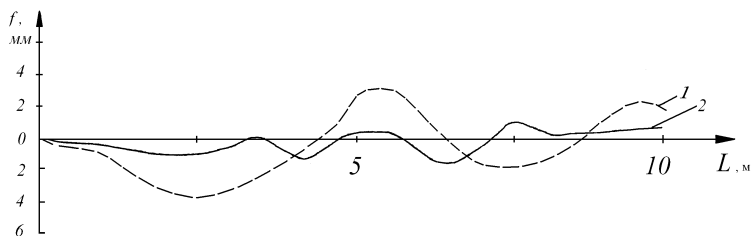


Рис. 2. Деформация нижнего гофра обшивок

После снятия прижимов с обечаяк происходит перераспределение деформаций плоских обшивок без увеличения амплитуды и частоты волнистости.

После полного восстановления боковой стенки деформации гофрированной части наружной обшивки практически не изменилась, а деформации плоских участков незначительно увеличилась, перераспределились по длине обшивки (рис. 1, кривая 2, рис. 4, кривая 4). Установка боковой стенки на раму тепловоза не вызывает изменений деформаций гофрированной части обшивки ни по характеру изменений деформаций гофрированной части обшивки и ни по характеру распределения, ни по величине (рис. 3, кривая 4), но приводят к значительному перераспределению и увеличению до 17 мм деформаций плоских обшивок (рис. 5, кривая 4).

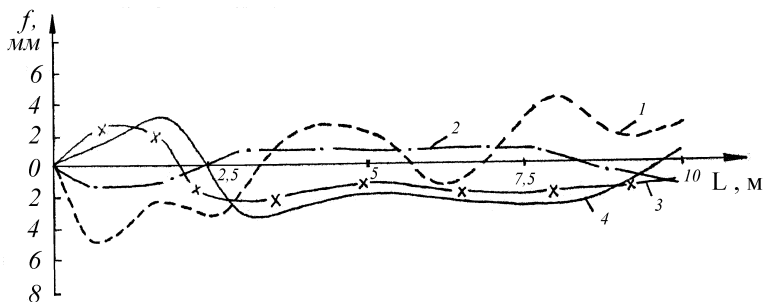


Рис. 3. Деформация верхнего гофра обшивок

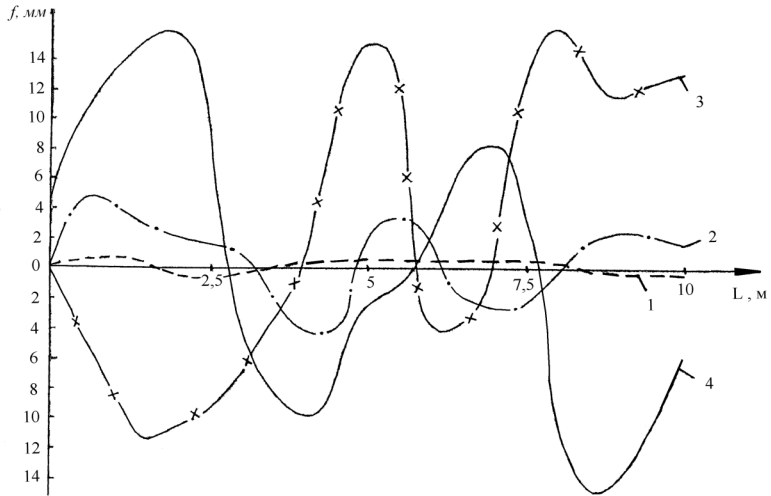


Рис. 4. Деформация плоских обшивок под окнами

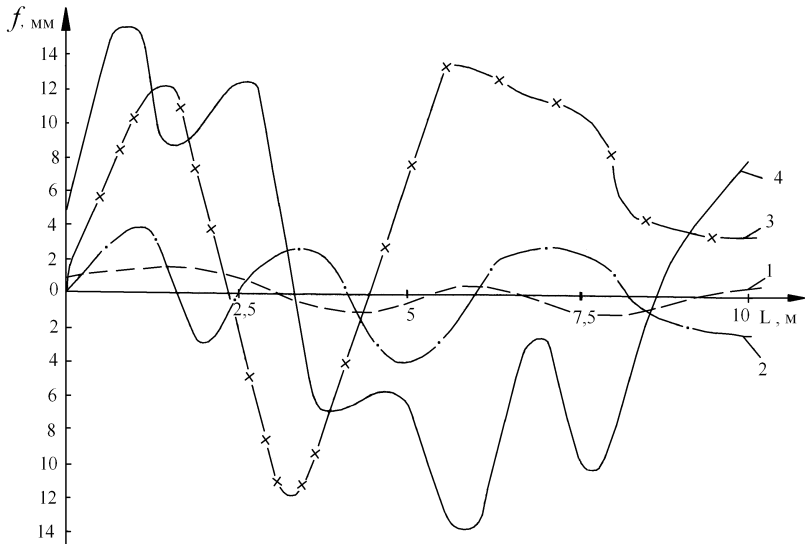


Рис. 5. Деформация плоских обшивок над окнами

Выводы

1. Практически все технологические операции вносят свой вклад в деформации формоизменения боковой стенки тепловоза.
2. Транспортировка обшивок вызывает перераспределение деформаций и увеличивает деформацию плоских обшивок до 30%.
3. Наибольший вклад в перемещение металла плоских обшивок вносит сварка обечаек с плоскими обшивками.
4. Максимальные перемещения, превышающие допустимые в 4-5 раза, наблюдаются на плоских обшивках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений: Машиностроение, 1984. 278 с.
2. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1994. 28 с.
3. Гедрович А.И. Повышение качества сварных листовых конструкций за счет регулирования сварочных деформаций: Автореф. дис. д.т.н.: 05.03.06 / Киев НТУУ «КПИ». – К., 1999. – 30 с.
4. Гедрович А.И., Гальцов И.А., Друзь О.Н., Ткаченко А.Н. Исследование изменений напряжений и деформаций в тонколистовой металлоконструкции обшивки вагона дизельпоезда, после сборки-сварки и после ходовых испытаний // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: Тези доповідей I Всеукр. наук.-техн. конф. Суми: СумДУ. 2001. С. 14 – 16.

Gedrovich A.I., Borodina E.V., Nekrutenko V.V. The research of the movement of the metal during welding of the side walls of the rolling stock

The results of experimental studies of deformation of thin-sheet elements of the side walls of the sheet of rolling stock. Shows the graphs of the deformation of the corrugated and flat sheets after welding of the beams stiffness. The challenge of creating such technologies of Assembly and welding, which would provide a reduction of deformations and displacements to levels set by technological conditions for production of structures. Observed maximum displacements exceeding the permissible 4-5 times on the flat panels.

Keywords: sheet metal, welding, deformation of the side wall corrugation.

Гедрович Анатолий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры обработка металлов давлением и сварки. Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: исследование напряжений и деформаций при сварке металлов различной толщин.
e-mail: gedra@poisk.lg.ua

Бородина Екатерина Валентиновна – аспирант кафедры обработка металлов давлением и сварки Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: сварка тонкого металла.
e-mail: borodinaket@rambler.ru

Некрутенко Виктор Витальевич – старший преподаватель кафедры охраны труда Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск.
Научные интересы: напряжения и деформации при сварке
e-mail:kaf_lipp@mail.ru

Gedrovich Anatoliy Ivanovich – doctor of technical Sciences, Professor of chair of treatment of metals by pressure and welding. Luhansk national University named after Volodymyr Dahl, Luhansk. Research interests: study of stresses and deformaci when welding metals of different thicknesses.
e-mail:gedra@poisk.lg.ua

Borodina Ekaterina V. – postgraduate student of the Department of processing of metals by pressure and welding Luhansk national University named after Volodymyr Dahl, Luhansk. Research interests: welding thin metal..
e-mail: borodinaket@rambler.ru

Nekrutenko Victor V. – senior lecturer of the Department of labor Luhansk national University named after Volodymyr Dahl, Luhansk. Research interests: stress and strain during welding
e-mail:kaf_lipp@mail.ru

*Статья поступила
26 сентября 2017 г.*

© Гедрович А.И., Бородина Е.В., Некрутенко В.В. 2017

Гальцов И.А.

ФОРМИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАКИРОВАННОЙ СТАЛИ 09Г2С+08Х18Н10Т

Galtsow I.A.

FORMATION OF RESIDUAL STRESSES WITH MANUAL ARC WELD OF PLASTIC STEEL 09Mn2Si + 08Cr18Ni10Ti

Исследованы закономерности формирования продольных остаточных напряжений в швах ручной дуговой сварки РДС, переходного и плакирующего слоев, плакированной стали 09Г2С+08Х18Н10Т. Исследования произведены при обычном дуговом процессе и сварочном процессе с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны, заключающимся во введении в сварочную ванну частиц макрохолодильников и низкочастотных колебаний электрода. Выявлено, что после сварки переходного слоя характерно аномальное возникновение напряжений вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения свариваемых сталей 09Г2С и 08Х18Н10Т, имеющее смещение эпюры в сторону аустенитной стали 08Х18Н10Т. На основе анализа эпюр остаточных напряжений от накладки первого валика, переходного и плакирующего слоя выявлены наиболее структурно-напряженные зоны для РДС. Применение комплексного воздействия на жидкий металл сварочной ванны позволяет понижать пиковые растягивающие напряжения до 5% при сварке переходного слоя и до 8% при сварке плакирующего слоя.

Ключевые слова: напряжение, электрод, сталь, технология, сварочный шов, трещина, аустенит, пластическая деформация, ферритометр, сварочный цикл, зона, предел текучести.

Введение

Работоспособность сварных конструкций в значительной мере зависит от термомеханических процессов, происходящих в области сварного шва, значений пластической деформации и уровня продольных остаточных напряжений. Продольные сварочные напряжения в соединениях могут достигать предела текучести σ_T свариваемого металла и более, а поперечные напряжения при плоском напряженном состоянии могут не превышать $0,3-0,4\sigma_T$ [1]. Поэтому немаловажной задачей является выявление и регулиро-

вание уровня продольных остаточных сварочных напряжений с целью устранения деформирования конструкций, образования холодных и горячих трещин.

В машиностроении, судостроении, нефтегазовой промышленности довольно часто применяют корпусные конструкции из плакированной стали сочетающей два слоя, основной слой - ферритоперлитный и плакирующий из аустенитной стали. Обычно сварка основного ферритоперлитного слоя не вызывает особых трудностей, но сварка плакирующего аустенитного слоя сопряжена с соединением двух разнородных сталей, различных по своим физико-механическим свойствам. На этапе охлаждения переходного слоя сварного соединения от ферритоперлитной стали к аустенитной после сварки характерно аномальное возникновение напряжений вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения. В аустенитной стали возникают растягивающие напряжения, так как она имеет значительно большее уменьшение объема по сравнению с ферритоперлитной, а в ферритоперлитной - уравновешивающих их напряжений сжатия [6].

Поля остаточных напряжений в однородных и разнородных соединениях близки между собой и отличаются лишь некоторым смещением эпюры в сторону стали с меньшей теплопроводностью (в данном случае в сторону аустенитной стали).

Эти напряжения в большинстве случаев не могут быть сняты термообработкой и создают опасность как разрушения, так и изменения размеров конструкции во времени. Нецелесообразность термообработки соединений с аустенитным швом обусловлена развитием диффузионных процессов обезуглероживания и охрупчивания отдельных зон соединения, а для швов с аустенитно-ферритным швом - охрупчивание шва в результате перехода ферритной фазы в хрупкую σ -фазу [6].

Одним из направлений уменьшения остаточных сварочных напряжений является регулирование термического цикла. К ним относятся такие технологические способы 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 применению способа (ЭМП) интенсивного электромагнитного перемешивания 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 [6].

Начало исследований кристаллизации стали с макрохолодильником

положил академик Н. Т. Гудцов [2]. Попадая в жидкий металл 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 [2].

При введении охлаждающей присадки в жидкий металл сварочной ванны наряду с позитивным влиянием на металлургию шва возникает проблема завышения геометрических характеристик валика. Решение данной проблемы состоит в применении низкочастотной поперечной вибрации сварочной проволоки [4,5].

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 [5].

Анализ процессов кристаллизации стали с макрохолодильниками и низкочастотными поперечными колебаниями позволил разработать способ РДС с комплексным воздействием, базирующийся на вводе в жидкий металл сварочной ванны макрохолодильников с массовой долей 80-90% от массы электродного стержня ($M_{\text{макр}}=80-90\%$) и вибрацией электрода ($\omega=4-5$ Гц, $A=2$ мм) [5].

Целью работы является исследование закономерностей формирования продольных остаточных напряжений при ручной дуговой сварке (РДС) переходного и плакирующего слоев плакированной стали 09Г2С+08Х18Н10Т при обычном дуговом процессе и с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны (макрохолодильник $M_{\text{макр}}=80-90\%$, вибрация электрода $\omega= 4-5$ Гц; $A=2$ мм).

Методика исследования

При экспериментальных исследованиях разделка сварного соединения

плакированной стали соответствовала стыковому соединению С20 ГОСТ 16098-80 (рис. 1, а). Сварка плакированной стали 09Г2С+08Х18Н10Т разделялась на три этапа: а - сварка основного несущего слоя, стали 09Г2С (рис. 1, б); б - сварка переходного слоя от ферритоперлитной стали 09Г2С к аустенитной 08Х18Н10Т (рис. 1, в); в- сварка плакирующего слоя аустенитной стали 08Х18Н10Т (рис. 1, г). Сварка основного слоя стали 09Г2С выполнялась источником питания ВДУ-504, электродами УОНИИ-13/55 (тип Э42А) $\varnothing 3$ и 4мм с фтористо-кальциевым покрытием.

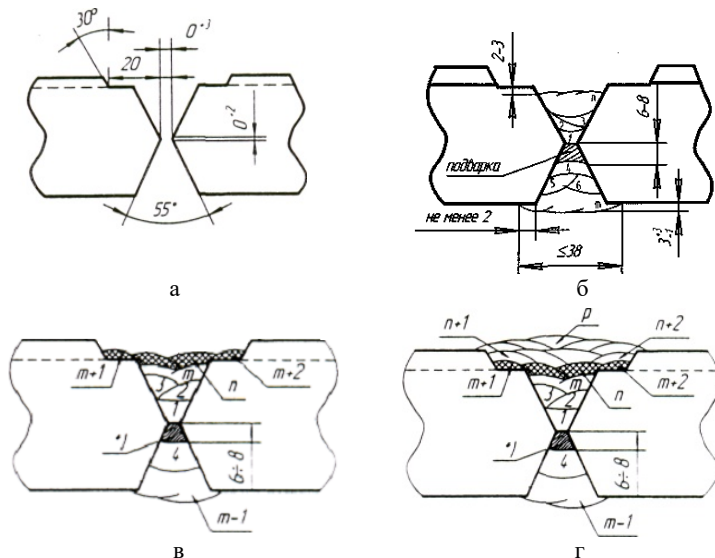


Рис. 1. Разделка кромок для сварки плакированной стали 09Г2С+08Х18Н10Т и этапы сварки: а - разделка тип С20 ГОСТ 16098-80; б - сварка основного слоя, стали 09Г2С; в - сварка переходного слоя; г- сварка плакирующего слоя 08Х18Н10Т

Сварка переходного слоя выполнялась электродами ЦЛ-9 и плакирующего ЦЛ-11, с вводом в сварочную ванну внутренних поглотителей тепла – макрохолодильников и низкочастотных, вибрационных колебаний, амплитудой $A=2$ мм. Частоту колебаний - ω изменяли от 0,5 до 40Гц. Опробовали три типа колебаний – поперечные, круговые и продольные. Макрохолодильники изготавливались из проволоки такого же химического состава что и материала электродного стержня, диаметром в $1,5 \div 3$ раза меньше диаметра электрода. При диаметре электрода $d_{эл}=3$ мм, размеры макрохолодильника составляли $\varnothing_M=1,2$ мм, длина $L_M=1$ мм при $d_{эл}=4$ мм размеры макрохолодильника $\varnothing_M=2$ мм, $L_M=1,5$ мм. Крепление макрохолодильника

производилось по верху обмазки электрода спирально (рис. 2, а), с учетом массы макрохолодильника 80÷90% от массы электродной проволоки. Низкочастотные колебания генерировались эксцентриковым вибратором, прикрепленным к рукоятке электрододержателя (рис. 2, б) [4, 5].

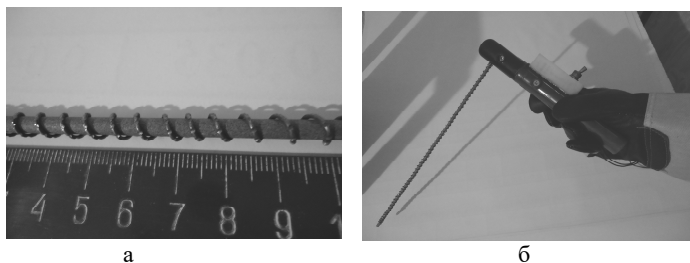


Рис. 2. Технология ручной дуговой сварки с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны: а- спиральное крепление макрохолодильника к электроду; б- крепление эксцентрикового вибратора к электрододержателю

Режимы ручной дуговой сварки переходного и плакирующего слоя приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Режимы ручной дуговой сварки переходного и плакирующего слоя стали 09Г2С+08Х18Н10Т

(постоянный ток, обратной полярности)

Диаметр, мм	I _{св} , А	Уд, В	V _{св} , см/мин	Погонная энергия, кДж/см	Межваликовая температура, °С
3,0	90-110	21-22	70	15,1	30
4,0	130-140	22-23	170	8,1	50-60

При сварке переходного и плакирующего слоя стали 09Г2С+08Х18Н10Т формируются остаточные сварочные напряжения, которые в сочетании со склонностью сварного соединения к фазоструктурным изменениям, механической и структурной неоднородности к горячим или холодным трещинам создают опасность расслаивания металла и разрушения конструкции. Поэтому особое внимание уделяли исследованию остаточных напряжений в зоне формирования сварного соединения разнородных сталей 09Г2С+08Х18Н10Т переходного слоя и заварке плакирующего слоя 08Х18Н10Т.

В исследованиях остаточные продольные напряжения определяли раз-

дельно. Со стороны стали 09Г2С прибором ИОН-4М, со стороны стали 08Х18Н10Т по образованию магнитной α -фазы, ферритометром ФА-1М [3].

Методика определения остаточных напряжений в аустенитной стали базируется на распаде аустенита и появлению α -фазы. Наличие пластической деформации и полей высоких остаточных растягивающих напряжений 1 рода приводит в области шва и околошовной зоне к распаду парамагнитного аустенита, фазовому превращению и появлению магнитной α -фазы [3]. По содержанию α -фазы в сварном соединении можно качественно судить о распределении остаточных сварочных напряжений.

Для исследований использовали пластины плакированной стали размером 300×300×35мм. Толщина стали 09Г2С (30мм), стали 08Х18Н10Т (5мм).

Результаты исследований

Экспериментально получено отношение максимальных продольных растягивающих напряжений к поперечным: продольные- $1,15\sigma_{т,}=230$ МПа, поперечные- $0,4\sigma_{т,}=80$ МПа (переходной слой), (рис. 3, а). Так как продольные напряжения по величине в 2,8 раза превосходят поперечные и более наглядно отображают изменение остаточных сварочных напряжений, то в дальнейших исследованиях измеряли продольных напряжения.

При накладке первого валика переходного слоя (рис. 1, в) и анализа эпюры остаточных напряжений (рис. 3, а) можно выделить следующие наиболее структурно-напряженные зоны для ручной дуговой сварки, электрод ЦЛ-11 Ø-4мм.

Зона 1- сжимающих напряжений находится в основном металле аустенитной стали, не подвергшемся при сварке пластической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений 25 МПа, среднее значение 13 МПа, протяженность зоны ≈ 13 мм.

Зона 2- максимальных сжимающих напряжений (протяженность зоны ≈ 6 мм) находится в основном металле аустенитной стали, подвергшемся в процессе сварочного термометформационного цикла пластической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений 30 МПа, среднее значение 17 МПа.

Зона 3- максимальных растягивающих напряжений. Шов и околошовная зона (ширина ≈ 8 мм) аустенитной стали находятся в области пластических деформаций. Уровень максимальных растягивающих напряжений 230 МПа, среднее значение 110 МПа.

Зона 4- максимальных растягивающих напряжений. Шов и околошовная зона (ширина ≈ 13 мм) ферритоперлитной стали находятся в области пластиче-

ских деформаций. Уровень максимальных растягивающих напряжений 170 МПа, среднее значение 70 МПа.

Зона 5- максимальных сжимающих напряжений (протяженность зоны ≈ 16 мм). Находится в основном металле ферритоперлитной стали подвергшемся в процессе сварочного термомодеформационного цикла пластической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений 130 МПа, среднее значение 65 МПа.

Зона 6- сжимающих напряжений. Находится в основном металле ферритоперлитной стали, не подвергшемся при сварке пластической деформации. Уровень максимальных сжимающих напряжений 110 МПа, среднее значение 60 МПа, протяженность зоны ≈ 21 мм.

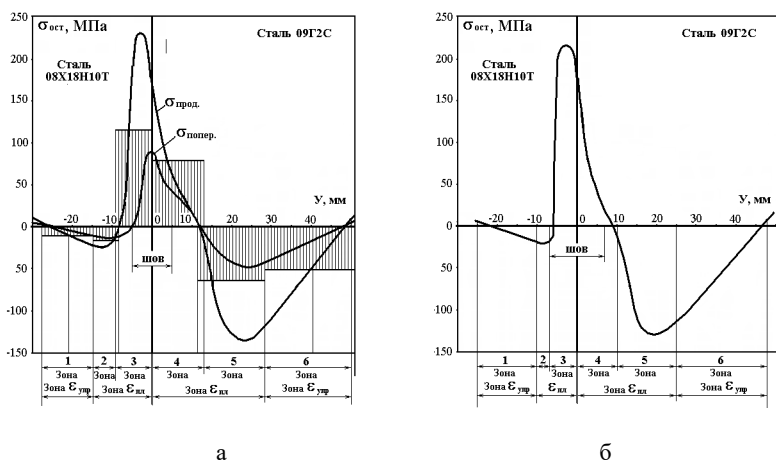


Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений (РДС) сварки первого валика переходного слоя: а- сварка без воздействия на металл сварочной ванны; б- сварка с макрохолодильником ($M_{макр} = 80 \div 90\%$) и вибрацией электрода ($\omega = 4 \div 5$ Гц, $A = 2$ мм)

После разделения сварного соединения на характерные структурно напряженные зоны главной задачей исследований являлось логически обоснованный правильный выбор зон, которые служат основным источником деформирования. Основываясь на полученных экспериментальных данных, следует отметить, что в зоне 3 и 4 наблюдаются максимальные растягивающие остаточные напряжения ($\sigma_{ост} = 230$ МПа), превышающие предел текучести материала ($\sigma_T = 200$ МПа) в 1,15 раза, все это позволяет сделать заключение о том, что зоны 3 и 4 являются источником деформации переходного слоя.

При ручной дуговой сварке ЦЛ-11 Ø-4мм переходного слоя с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны (макрохолдильник $M_{\text{макр}}=80-90\%$, и вибрация $\omega=4-5\text{Гц}$; $A=2\text{мм}$) (рис. 3, б) (табл. 2) в зоне 3 и 4 наблюдается понижение уровня растягивающих остаточных напряжений на 5% (с 230 МПа до 220 МПа).

При накладке первого валика плакирующего слоя (рис. 1, г) стали 08Х18Н10Т (ЦЛ-11Ø-4мм) и анализе эпюры остаточных напряжений (рис. 4, а) в зоне 3 и 4 (табл. 2) наблюдаются максимальные растягивающие остаточные напряжения ($\sigma_{\text{ост}}=245\text{ МПа}$), превышающие предел текучести материала ($\sigma_{\tau}=200\text{ МПа}$) в 1,2 раза. Использование РДС с комплексным воздействием на жидкий металл сварочной ванны в зоне 3 и 4 (рис. 4, б) позволило установить понижение уровня растягивающих остаточных напряжений на 8% (с 245 МПа до 225 МПа).

Т а б л и ц а 2

Результаты исследований характерных структурно-напряженных зон при ручной дуговой сварке

Зона 1		Зона 2		Зона 3		Зона 4		Зона 5		Зона 6	
Сжимающие напряжения, МПа	Протяженность, мм	Сжимающие напряжения, МПа	Протяженность, мм	Растягивающие напряжения, МПа	Протяженность, мм	Растягивающие напряжения, МПа	Протяженность, мм	Сжимающие напряжения, МПа	Протяженность, мм	Сжимающие напряжения, МПа	Протяженность, мм
РДС, переходной слой											
25	13	30	6	230	8	70	13	130	16	110	21
РДС, переходной слой ($M_{\text{макр}}=80\div 90\%$, $\omega=4\div 5\text{Гц}$; $A=2\text{мм}$)											
20	14	25	4	220	6	155	10	130	15	110	22
РДС, плакирующий слой											
85	28	95	9	245	10	245	10	95	9	85	28
РДС, плакирующий слой ($M_{\text{макр}}=80\div 90\%$, $\omega=4\div 5\text{Гц}$; $A=2\text{мм}$)											
75	24	85	8	225	8	225	8	85	8	75	24

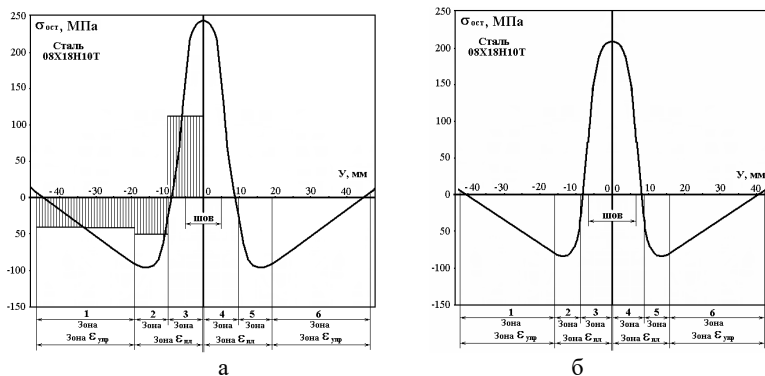


Рис. 4. Эпюры остаточных напряжений РДС сварки первого валика плакирующего слоя: а- сварка без воздействия на металл сварочной ванны;
 б- сварка с макрохолодильником ($M_{\text{макр}}= 80\div 90\%$)
 и вибрацией электрода ($\omega = 4\div 5$ Гц, $A= 2$ мм)

Выводы

1. На этапе охлаждения сварного соединения в плакированной стали 09Г2С и 08Х18Н10Т в переходном слое образуются максимальные растягивающие остаточные напряжения ($\sigma_{\text{ост}}=230$ МПа), превышающие предел текучести материала ($\sigma_{\text{T}}=200$ МПа) в 1,15 раза, в плакирующем слое ($\sigma_{\text{ост}}=245$ МПа) превышающие предел текучести материала ($\sigma_{\text{T}}=200$ МПа) в 1,2 раза.

2. Напряжения в большинстве случаев не могут быть сняты термообработкой и создают опасность как разрушения, так и изменения размеров конструкции во времени.

3. При ручной дуговой сварке переходного слоя плакированной стали (от 09Г2С к 08Х18Н10Т) с макрохолодильником и низкочастотной вибрацией электрода ($M_{\text{макр}}=80\div 90\%$, $\omega = 4\div 5$ Гц; $A=2$ мм) в зоне пиковых растягивающих напряжений наблюдается понижение уровня остаточных напряжений на 5% (с 230 МПа до 220 МПа).

4. При ручной дуговой сварке плакирующего слоя плакированной стали (08Х18Н10Т) с макрохолодильником и низкочастотной вибрацией электрода ($M_{\text{макр}}=80-90\%$, $\omega = 4-5$ Гц; $A=2$ мм) в зоне пиковых растягивающих напряжений наблюдается понижение уровня остаточных напряжений на 8% (с 245 МПа до 225 МПа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гедрович А.И. Пластическая деформация при сварке. Луганск: изд-во ВУГУ, 1998. -237с.

2. Гудцов Н.Т., Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. М.: Металлургия, 1956.

3. Сагалевиц В.М., Савельев В.Ф. Стабильность сварных соединений и конструкций. М.: Машиностроение, 1986. –264с.

4. Гальцов И.А. Технология ручной дуговой сварки разнородных сталей с внутренним теплопоглотителем // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб.науч.тр.№2 (19) 2017. –Луганск: изд-во ЛНУ им.В. Даля, 2017. С. 66-72.

5. Гальцов И.А., Каленская А.В., Гедрович А.И., Сороканич С.В. Электродуговая сварка плакированной стали с комплексным воздействием на металл сарочной ванны. Луганск.: изд-во ЛГУ им. В. И. Даля, 2016. 148 с.

6. Патон Б.Е. Многослойная сталь в сварных конструкциях. К.: «Техника», 1984. – 284с.

Galtsow I.A. formation of residual stresses with manual arc weld of plastic steel 09Mn2Si + 08Cr18Ni10Ti

The regularities of formation of longitudinal residual stress in the seams of the manual arc welding of RDS, transition and cladding layers of clad steel 09Mn2Si+08Cr18Ni10T. Research produced by conventional arc process and welding process kompletnym impact on the liquid metal weld pool, which consists in introducing into the weld pool particles-macrochelodina and low-frequency oscillations of electrode. It is revealed that after welding, the transition layer is characterized by the anomaly stresses in consequence of differences of temperature coefficients of linear expansion of the welded steels 09Mn2Si and 08Cr18Ni10T with an offset of the plot to the side of austenitic steel 08Cr18Ni10T. Based on the analysis of the plots of residual stresses from the pad of the first cushion, transition and cladding layer revealed the most structurally-intense areas for RDS. The use of complex effects on the liquid metal SVA-term baths can reduce the peak tensile stresses of up to 5% when welding transition layer and up to 8% when welding the cladding layer.

Keywords: tension, electrode, steel, technology, welding seam, crack, austenite, plastic deformation, ferritometer, welding cycle, zone, yield point.

Гальцов И. А. – канд. техн. наук, доцент Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: свариваемость сталей аустенитного класса и разнородных, аустенитного и ферритоперлитного классов.

e-mail: galzow.igor@yandex.ru

Galtsov I.A. is a candidate of technical sciences, associate professor of Viadimir Dahl Luhansk National university. с. Lugansk. Scientific interests: weldability of steels of austenitic class and dissimilar, austenite and ferriteperlite classes.

e-mail: galzow.igor@yandex.ru

*Статья поступила
25 сентября 2017 г.
© Гальцов И. А., 2017*

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

Войтенко В.А., Войтенко Г.О.

**ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ И ПОРОШКОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПЛАНШЕТНОГО
КОМПЬЮТЕРА**

Voytenko V.A., Voytenko G.O.

**DEVICE FOR MEASURING PHYSICAL AND TECHNICAL
PROPERTIES OF COMPOSITE AND POWDER
MATERIALS BASED ON TABLET COMPUTERS**

Предложена конструкция прибора, реализующего ультразвуковой эхо-метод и метод сквозного прозвучивания для определения модуля Юнга, коэффициента Пуассона, плотности материала по скорости распространения упругих волн в среде, а также несплошностей среды. Разработано программное обеспечение для автоматизации процесса измерений, ввода и отображения информации с планшетного компьютера или смартфона. Реализована схема электропитания прибора как от планшетного компьютера через стандартный порт USB, так и от отдельного источника электропитания. Обсуждаются результаты испытаний разработанного ультразвукового прибора. Акустический прибор может быть использован для контроля процесса получения материалов с заданными характеристиками.

Ключевые слова: ультразвуковой прибор, планшетный компьютер, композиционные материалы, порошковые материалы, физико-технические свойства.

Введение

Композиционные материалы, в отличие от однородных материалов, могут в широких пределах менять свои свойства в зависимости от процентного содержания наполнителя и основного материала, его структуры, физических свойств и других параметров [1]. Порошковые материалы также могут иметь различные физико-технические свойства в зависимости от температуры, фракционного состава, структуры, давления и времени спекания, газового состава атмосферы, выделяемых при спекании газов [2]. Возможность получения материалов с заданными свойствами, переработки отходов производства, развития новых методов получения композиционных и порошковых материалов делает актуальной разработку прибора для измерений физико-технических свойств таких материалов. В частности,

является перспективным применение способа спекания порошковых и гранулированных материалов тугоплавких металлов путем пропускания через порошок электрического тока в вакууме [3]. Акустический прибор для измерения физико-технических свойств материалов по условиям распространения упругих волн в среде позволит контролировать процесс получения материалов с заданными характеристиками.

Существующие акустические приборы имеют высокую стоимость и часто узкоспециализированы (дефектоскоп, плотномер, толщиномер, зерномер и др.) [4–6]. Такие приборы представляют собой законченную конструкцию, в состав которой входят все необходимые элементы, включая клавиатуру или кнопки управления и светодиодный или жидкокристаллический экран. Разработка оригинального, дешевого прибора как приставки к планшетному компьютеру или смартфону позволит расширить возможности ученого и технолога.

Целью работы является разработка и испытание ультразвукового прибора-приставки к портативному компьютеру для осуществления контроля физико-технических свойств композиционных и порошковых материалов.

Методика исследования

При разработке прибора для измерений физико-технических свойств композиционных и порошковых материалов было принято решение использовать возможности широко распространенных компьютерных малогабаритных устройств, таких как планшетный компьютер и смартфон. Указанные устройства первоначально не рассчитаны на решение подобных задач, связанных с обеспечением интерфейсных функций ввода-вывода данных, их хранением и передачей в базу данных [7]. Однако наличие стандартного последовательного порта USB и программного обеспечения, позволяющего подключать к планшетному компьютеру внешние пассивные устройства с автономным электропитанием или питанием через USB шину, позволяет использовать мощные возможности таких устройств в их совместной работе с внешними измерительными приборами. Используя современные возможности электроники и компьютерной техники, был разработан ультразвуковой прибор, упрощенная блок-схема которого показана на рис. 1.

Ультразвуковой прибор позволяет проводить контроль физико-технических свойств материалов как в режиме эхо-локации, так и путем сквозного прозвучивания. Первый режим удобен при контроле сравнительно небольших объектов с малым и средним затуханием ультразвуковых упругих волн. Второй режим удобен при контроле композиционных материалов с нитевидным или волокнистым наполнителем путем сквозно-

го прозвучивания вдоль волокон, а также для контроля протяженных изделий или материалов со значительным поглощением ультразвука. К таким материалам относятся композиты с размером наполнителя, сопоставимым с длиной ультразвуковых волн в материале [8]. Этот, на первый взгляд, недостаток позволяет по величине затухания ультразвуковых волн на разных частотах приблизительно определить средний размер зерен или фракционный состав наполнителя и его процентное соотношение с основным материалом.

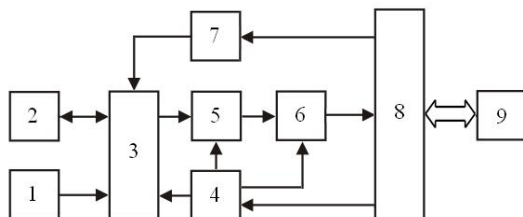


Рис. 1. Блок-схема прибора для измерения физико-технических свойств композиционных и порошковых материалов: 1 – приемный преобразователь; 2 – приемо-передающий преобразователь; 3 – электронный коммутатор; 4 – блок амплитудно-временной регулировки усиления; 5 – предварительный усилитель; 6 – усилитель высокой частоты; 7 – генератор зондирующих сигналов; 8 – микроконтроллер; 9 – планшетный компьютер

Программное обеспечение с открытым доступом для пользователя позволяет в зависимости от решаемой задачи гибко перестраивать алгоритм проведения измерений и процедуру интерпретации результатов. Разработанное программное обеспечение позволяет вводить параметры контроля непосредственно при помощи сенсорного экрана планшета, на котором выводится текущая информация прибора. Предусмотрено удобное изменение масштаба по шкалам амплитуды, времени и глубины зондирования. Амплитудно-временное управление усилением на этапах предварительного и окончательного усиления делает удобным процесс подстройки прибора под конкретный исследуемый материал.

Разработанный прибор прошел испытания с тремя пьезокерамическими излучателями с частотами 1,2 МГц, 3 МГц и 8 МГц. Пьезокерамический излучатель с частотой механического резонанса 1,2 МГц использовался для контроля композиционных материалов на основе эпоксидных смол, так как затухание ультразвуковых колебаний в таких материалах на данной частоте обеспечивает хорошие метрологические характеристики прибора. Пьезоизлучатель с частотой механического резонанса 3 МГц использовался для контроля стальных образцов благодаря малому затуханию ультразвука в сталях на данной частоте [9]. Пьезокерамический излучатель с ча-

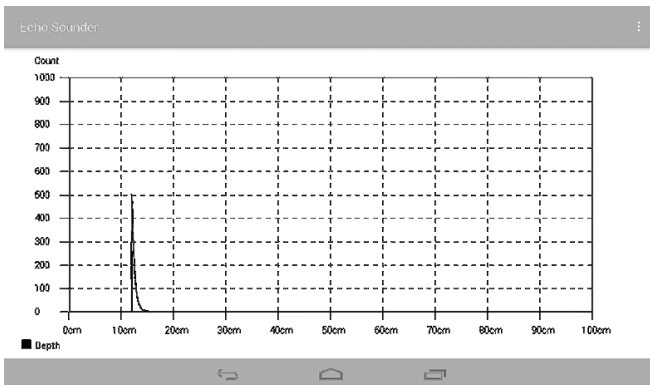
стойкой механической резонанса 8 МГц применялся для контроля композитов с порошковым наполнением.

Результаты исследований

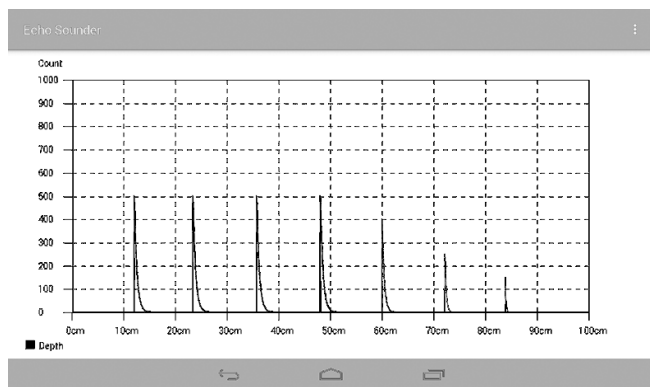
Разработанный прибор прошел испытания с использованием однородных жидких и твердых сред, а также эталонных образцов с известными физико-техническими характеристиками, полученными другими способами. На рис. 2, а показан скан экрана планшетного компьютера при измерении скорости звука в стальном образце при сквозном прозвучивании. В этом режиме первый преобразователь излучает акустический сигнал, а второй принимает его с противоположной стороны образца. На экране отчетливо виден единичный импульс.

На рис. 2, б показан скан экрана в режиме эхо-локации, когда один и тот же преобразователь излучает и принимает отраженный от противоположной поверхности образца акустический сигнал. В этом случае на экране видны многократно отраженные от обоих торцов образца эхо-сигналы, расстояние между которыми равно толщине образца или половине времени распространения эхо-сигнала в обе стороны, умноженному на скорость звука в среде. В обоих случаях (рис. 2, а, б) используется время-амплитудная регулировка коэффициента усиления, позволяющая компенсировать уменьшение амплитуды эхо-сигнала при многократном отражении. Частота зондирования меняется от 1 до 60 импульсов в секунду, обеспечивая как стационарные измерения, так и высокую скорость измерений до 0,5 м/с на движущихся изделиях и пленочных материалах. При наличии сети WiFi в помещении, где проводятся измерения, возможно автоматическое занесение результатов измерений в стандартную базу данных на SQL сервере.

Исследование композитов на основе эпоксидной смолы ЭД-5 с различной концентрацией порошковых металлических и неметаллических наполнителей показали, что при частоте ультразвука 1,2 МГц скорость распространения продольных волн в композитах плавно уменьшается с ростом концентрации наполнителя. Причем, скорость продольных волн уменьшается до 1,5–2 раз при увеличении концентрации порошкового наполнителя на 80–90%. При этом предельная контролируемая толщина образца значительно уменьшалась.



a



б

Рис. 2. Скан экрана планшетного компьютера при измерении скорости звука в образце: а – при сквозном прозвучивании; б – в режиме эхо-локации

Для данных композиционных материалов, в зависимости от концентрации наполнителя, предельная контролируемая толщина находилась в пределах 0,1–1 м. В случае волокнистых наполнителей, в зависимости от направления прозвучивания вдоль или поперек волокон, глубина сквозного прозвучивания не превышала 0,1–0,3 м. Понижение частоты ультразвуковых волн менее 1 МГц позволило увеличить толщину сквозного прозвучивания композитов на основе эпоксидных смол, однако при этом резко снижалась точность определения концентрации наполнителя по уменьшению скорости распространения продольных волн в материале.

Выводы

1. Разработанный ультразвуковой прибор-приставка к планшетному компьютеру или смартфону позволяет измерять физико-технические свойства композиционных и порошковых материалов, используя известные их зависимости от скорости звука и коэффициентов рассеяния и поглощения в среде.
2. Использование планшетного компьютера как устройства ввода-вывода, хранения и передачи информации, а также источника электропитания для разработанного прибора-приставки позволило сделать процесс измерений удобным, а сам прибор компактным и дешевым.
3. Точность ультразвукового прибора зависит от скорости распространения ультразвука в среде и определяется частотой используемого ультразвука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тялина Л.Н., Минаев А.М., Пручкин В.А. Новые композиционные материалы: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. 80 с.
2. Мальцева Л.А., Гервасьев М.А., Куткин А.Б. Материаловедение: учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. 339 с.
3. Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Качаев А.А. Метод коллекторного компактирования нано- и полидисперсных порошков: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. 102 с.
4. Абульханов С.Р., Горяинов Д.С., Налимов А.Г. Инновационные приложения фокусаторов акустических волн // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2016. № 4. Т. 18. С. 153-160.
5. Кривошеев И.А., Шамурина А.И. Контроль образовавшихся несплошностей в образце твердого тела акустическим методом // Дефектоскопия. 2017. № 8. С. 29-34.
6. Данюк А.В., Растегаев И.А., Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю. Преобразователь акустической эмиссии повышенной надежности // Дефектоскопия 2017. № 1. С. 34-40.
7. Торельсон В.В., Бушуев А.П., Прокоди Р.Г. Планшет. Самоучитель работы на планшетном компьютере с ANDROID. М.: Наука и Техника, 2013. 336с.
8. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю. Оценка температурного коэффициента линейного расширения композита с дисперсными анизотропными включениями методом самосогласования // Механика композитных материалов. 2016. № 2. Т. 52. С. 209-224.
9. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488с.

Voytenko V.A., Voytenko G.O. Device for measuring physical and technical properties of composite and powder materials based on tablet computers.

The urgency of creating a universal instrument for measuring the physical and technical properties of composite and powder materials is shown. The construction of an instrument that realizes an ultrasonic echo method and a through sounding method for determining the Young's modulus, the Poisson's ratio, the material density with respect to

the velocity of propagation of elastic waves in the medium, and also the discontinuities of the medium is proposed. Software has been developed to automate the process of measuring, entering and displaying information from a tablet or smartphone. The power supply circuit of the device is realized both from a tablet computer via a standard USB port, and from a separate power supply. Results of tests of the developed ultrasonic device are discussed. The acoustic device can be used to control the process of obtaining materials with specified characteristics that will expand the capabilities of the scientist and technologist.

Keywords: *ultrasonic device, tablet computer, composite materials, powder materials, physical and technical properties.*

Войтенко Владимир Афанасьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: разработка новых методов и приборов исследования материалов и технологических процессов.

e-mail: vlvoitenko@gmail.com

Войтенко Галина Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: исследование электрофизических свойств перспективных материалов и приборы контроля природной среды.

e-mail: vlvoitenko@gmail.com

Voytenko Vladimir – Ph.D. (Eng), Docent of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, s. Lugansk. Scientific interest: developing of new methods and devices for the study of materials and processes.

e-mail: vlvoitenko@gmail.com

Voytenko Galina – Ph.D. (Eng), Docent of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, s. Lugansk. Scientific interest: study the electrical properties of advanced materials and environment monitoring devices.

e-mail: vlvoitenko@gmail.com

Статья поступила

3 сентября 2017 г.

© Войтенко В.А., Войтенко Г.О., 2017

Комаров Н.В., Войтенко В.В.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭХОЛОТ-ДЕФЕКТОСКОП

Komarov N.V., Voytenko V.V.

UNIVERSAL ECHO SOUNDER-FLAW DETECTOR

Исследована возможность объединения нескольких методов ультразвукового контроля на базе единого функционального блока и программного модуля. Решена задача согласования пьезокерамического гидрофона с генератором зондирующих радиопульсов и усилителем принятых гидрофоном акустических сигналов за счет включения гидрофона в цепь параллельного колебательного контура в качестве пьезокерамического конденсатора. Разработана конструкция и проведены испытания универсального эхолота-дефектоскопа, предназначенного для работы со смартфоном или планшетным ПК с операционной системой Android. Приведены результаты испытаний разработанного прибора.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, акустический сигнал, гидрофон, универсальный эхолот-дефектоскоп, генератор ударного возбуждения.

Введение

Акустические методы неразрушающего контроля широко применяются в производстве для контроля технического состояния изделий и агрегатов [1]. Акустическая локация является основным методом, применяемым при изучении рельефа водоемов, поиска подводных объектов и рыбных ресурсов [2]. Эхолоты используют при контроле глубины скважин, прочности строительных материалов, поиске дефектов в строительстве [3]. Повышение надежности и безопасности оборудования связано с ранним обнаружением дефектов материалов в авиации, на железнодорожном и морском транспорте [4]. Широкое применение акустического зондирования в производстве и на транспорте способствует динамичному развитию ультразвуковых электронных устройств на базе современных достижений науки и техники. Большое разнообразие таких устройств объясняется узкой специализацией оборудования [5].

Анализ методов акустического контроля и функциональных схем устройств, реализующих эти методы [4-6], показывает, что существует возможность создания универсальных акустических эхолотов-

дефектоскопов для широкого круга прикладных и научных задач. Такие устройства могут быть разработаны на базе современных гаджетов, таких как планшетные компьютеры или смартфоны, и являться малобюджетными приставками к ним. Широкий круг методов ультразвукового контроля может быть реализован при помощи специального программного обеспечения, управляющего работой электронного устройства-приставки. Разработка универсального эхолота-дефектоскопа является актуальной научно-технической задачей.

Задачами работы являются: исследование возможности объединения акустических методов неразрушающего контроля на базе единого функционального блока и программного модуля; разработка конструкции универсального эхолота-дефектоскопа и его испытания.

Целью работы является решение задачи объединения наиболее широко применяемых методов ультразвукового зондирования конденсированных сред в одном электронном устройстве-приставке к портативному компьютеру или смартфону.

Методика исследования

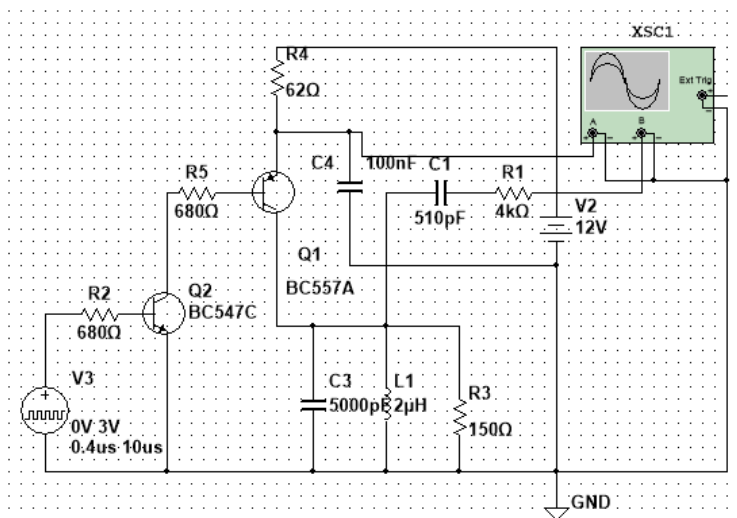
Эффективность зондирования универсального эхолота-дефектоскопа зависит от согласования пьезокерамического гидрофона с генератором зондирующих радиоимпульсов и усилителем принятых гидрофоном акустических сигналов. Анализ различных способов согласования гидрофона с универсальным эхолотом-дефектоскопом показывает, что наилучшим способом такого согласования в режимах излучения и приема акустических радиоимпульсов, а также одиночных видеоимпульсов, является включение гидрофона в цепь параллельного колебательного контура в качестве пьезокерамического конденсатора [7]. Такой конденсатор вместе с высокодобротной индуктивностью и нагрузочным резистором обеспечит в режиме излучения генерирование зондирующего радиоимпульса требуемой длительности с заданной частотой заполнения либо видеоимпульса заданной длительности и максимально возможной мощности, а также обеспечит достаточную чувствительность приема акустических сигналов аналогичной формы. Причем, излучение акустических зондирующих сигналов осуществляется на частоте механического резонанса пьезокерамического элемента гидрофона, а прием отраженных сигналов осуществляется на частоте механического антирезонанса пьезокерамического элемента [8]. Используя включение гидрофона в цепь колебательного контура, можно добиться максимально эффективной работы гидрофона как в режиме излучения, так и в режиме приема акустических сигналов. Используя одиночный импульс возбуждения колебательного контура либо пакет таких импульсов, удобно генерировать акустические зондирующие сигналы с заданными свойствами

ми. Одиночный импульс отрицательной либо положительной полярности можно использовать при измерении толщины изделий из металла и обнаружения внутренних дефектов и несплошностей. Для работы в режиме эхолота в жидких средах на больших глубинах длительность зондирующего радиоимпульса может быть значительной и содержать десятки и даже сотни периодов колебаний. Такие акустические сигналы удобно получать, используя пакет из требуемого количества импульсов ударного возбуждения колебательного контура, в состав которого в качестве емкости входит пьезокерамический элемент гидрофона.

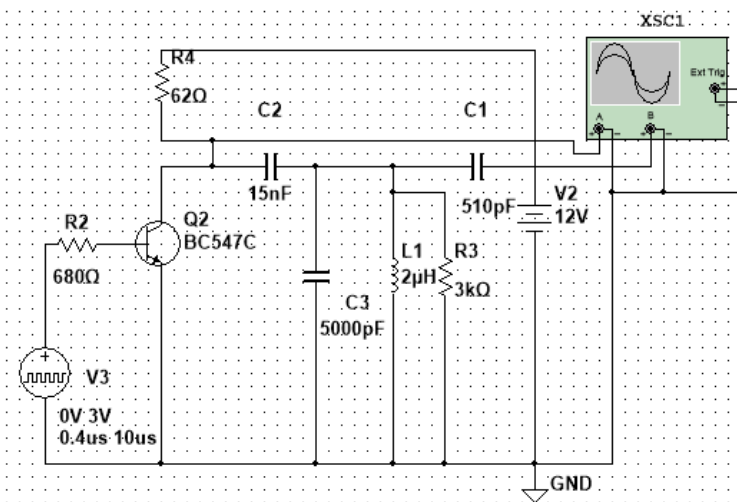
В зависимости от условий согласования акустических импедансов гидрофона и зондирующих сред могут быть использованы одиночные видеоимпульсы как отрицательной, так и положительной полярности, приложенные к реактивному сопротивлению пьезокерамического элемента гидрофона. Также могут быть использованы затухающие колебания с начальным колебанием положительной или отрицательной полярности. Для работы универсального эхолота-дефектоскопа в указанных режимах генерации и приема акустических сигналов может быть применено включение колебательного контура как в коллекторную, так и в эмиттерную цепи транзистора, обеспечивающее ударное возбуждение колебаний в колебательном контуре. В качестве примера на рис. 1, а, б приведены модели упрощенных схем генераторов ударного возбуждения, в которых колебательный контур с пьезокерамическим элементом включен в коллекторную цепь биполярного транзистора [9]. На рис. 2 приведены осциллограммы работы генератора ударного возбуждения рис. 1, а.

В качестве транзисторов для генератора ударного возбуждения желательно выбирать биполярные транзисторы р-п-р структуры, предназначенные для работы в генераторах или переключающих устройствах с высоким быстродействием. Они должны позволить работать с импульсными токами порядка 0,5-0,8 А и напряжениями более 100 В, а также иметь граничную частоту не ниже 300 МГц.

Учитывая тот факт, что такими параметрами обладают не многие биполярные транзисторы, и далеко не каждый из них обеспечит хорошую работу генератора ударного возбуждения, следует первоначально провести моделирование работы схем генераторов (рис. 1, а, б), заменив указанный в схеме транзистор на исследуемый, а затем, выбрав по результатам моделирования несколько транзисторов, обеспечивающих хорошую работу модели, провести макетные испытания генератора ударного возбуждения.



a



б

Рис. 1. Модель электрической принципиальной схемы генератора ударного возбуждения в среде Multisim: а – с колебательным контуром в цепи коллектора транзистора р-п-п структуры; б – с колебательным контуром в цепи коллектора транзистора п-р-п структуры

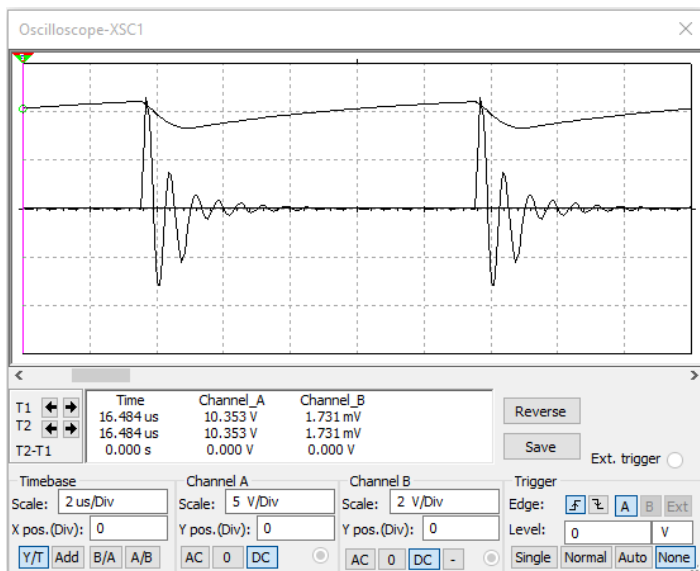


Рис. 2. Осциллограммы напряжений на коллекторе и эмиттере биполярного транзистора генератора ударного возбуждения

Следует отметить, что важными элементами моделей (рис. 1, а, б) является сопротивление нагрузки колебательного контура, а также сопротивление, эквивалентное входному сопротивлению схем ограничения и усиления сигналов. Сопротивления нагрузки, включенные в колебательные контуры моделей генераторов ударного возбуждения, подбирают для достижения требуемой степени затухания колебаний в колебательном контуре. Для каждого конкретного гидрофона, в зависимости от его емкости и частот механического резонанса и антирезонанса, существует оптимальный диапазон значений сопротивлений, обеспечивающих требуемое затухание в колебательном контуре. Для работы с разными гидрофонами в эхолот-дефектоскопе осуществляется переключение группы резисторов для перекрытия требуемого диапазона затухания колебаний в контуре. Также используется ключевая схема гашения второго полупериода зондирующего импульса в случае необходимости получения одиночного полупериода положительной или отрицательной полярности.

Результаты исследований

Разработанный эхолот-дефектоскоп, предназначенный для работы со смартфоном или планшетным ПК с операционной системой Android, со-

стоит из блока управления и пьезокерамического приемо-передатчика. Электропитание прибора осуществляется от блока питания на 12 В. При подключении эхолота-дефектоскопа через OTG-кабель планшетный ПК обнаруживает стандартное HID-устройство и автоматически запускает приложение «Эхолот-дефектоскоп». В появившемся меню выбирается режим эхолота или дефектоскопа.

В режиме эхолота прибор отправляет зондирующий импульс длительностью 50 мкс с помощью пьезокерамического излучателя в воду, и в течение 32 мс регистрирует отраженные импульсы. Отраженный импульс, принятый пьезокерамическим приемником, поступает на вход аналогового компаратора. В этот момент в микроконтроллере срабатывает прерывание, и микроконтроллер регистрирует отраженный импульс и глубину, на которой находится объект. Для определения глубины нахождения объекта микроконтроллер запускает 16-разрядный счетчик перед подачей зондирующего импульса, и при срабатывании прерывания запоминает текущий счет. На дисплее планшетного ПК отображается график глубины (по умолчанию до 16 м), который обновляется с частотой 10 Гц. На графике отображаются импульсы, отраженные от объектов, находящихся под водой на разных глубинах.

В режиме дефектоскопа прибор отправляет зондирующий импульс с заданной длительностью, например, 0,7 мкс, в металл и регистрирует отраженные импульсы. На дисплее планшетного ПК отображается график с указанием глубин, на которых в металле находятся дефекты на глубине до 1 метра. С помощью команд «Увеличить глубину» и «Уменьшить глубину», находящихся в меню панели действий, можно увеличить или уменьшить максимальную глубину на графике. При этом изменяется коэффициент усиления усилителя эхолота-дефектоскопа при помощи цифрового аналогового 10-разрядного преобразователя. Также возможен выбор режима изменения закона коэффициента усиления усилителя для работы в разных средах с различными коэффициентами рассеивания и поглощения акустических сигналов. Настройки реализованы при помощи переключателей на полевых транзисторах с индуцированным каналом n-типа.

Приложение «Эхолот-дефектоскоп» сохраняет результаты измерения глубины или обнаружения дефектов сплошности среды в текстовом файле на флэш-накопителе планшетного ПК для последующей обработки данных в среде MATLAB с целью повышения точности результатов измерений. Это позволяет не только проводить текущие измерения глубины водоемов, толщины изделий и материалов, обнаруживать внутренние пустоты и трещины, непровары и расслоения, а также автоматически документировать результаты измерений как в памяти планшетного компьютера, так и на сервере при наличии доступа к Wi-Fi или мобильному Интернету.

Выводы

Проведенные в лаборатории испытания разработанного универсального эхолота-дефектоскопа показали простоту и удобство работы, высокую точность и надежность устройства. Применение планшетного компьютера или смартфона с сенсорным экраном в качестве регистратора и интерфейса эхолота-дефектоскопа снижает стоимость устройства в целом в десятки раз по сравнению с имеющимися аналогами благодаря использованию серийных, широко распространенных гаджетов. Для увеличения глубины локализации и увеличения рабочего времени устройства без дозарядки аккумуляторов планшетного компьютера предусмотрена возможность использования компактного стандартного сетевого адаптера или внешнего аккумулятора большой емкости, что удобно при работе в полевых условиях и в условиях лаборатории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении. СПб.: СВЕН, 2007. 296 с.
2. Коровин В.П. Океанологические наблюдения в прибрежной зоне моря: учеб. пособие. СПб., изд. РГГМУ, 2007. 434 с.
3. Петин С.В., Сидоренко В.Г. Обзор методов дефектоскопии при обследовании трубопроводов // Молодой ученый. 2016. №2. С. 194-199.
4. Шевелев А.В. Методы и средства ультразвукового неразрушающего контроля цельнокатаных колес вагонов: дис. ...канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2004. 154 с.
5. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. М: Машиностроение, 2004. 864 с.
6. Бойчук А.С. Разработка технологий неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика с использованием ультразвуковых антенных решеток: дис. ...канд. техн. наук. Москва, 2016. 205с.
7. Бычков Ю.А., Золотницкий В.М., Чернышев Э.П. Основы теории электрических цепей: Учебник для вузов. СПб.: Издательство «Лань», 2002. 464с.
8. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений / Бобцов А.А. [и др.]. СПб ГУ ИТМО, 2011. 131 с.
9. Погодин А. А. Электроника: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 133 с.

Komarov N.V., Voytenko V.V. Universal echo sounder-flaw detector.

Areas of application of acoustic control methods are considered. The possibility of combining several methods of ultrasonic testing on the basis of a single functional unit and a software module was explored. The problem of matching the piezoceramic hydrophone with the generator of probing radio pulses and the amplifier of the acoustic signals received by the hydrophone is solved due to the inclusion of the hydrophone in the circuit of the parallel oscillatory circuit as a piezoceramic capacitor. The design and testing of a universal echo sounder-flaw detector designed for work with a smartphone or tablet PC

with the Android operating system was developed. The advantages of using the device during field work and in laboratory conditions are shown.

Keywords: *ultrasonic control, acoustic signal, hydrophone, universal echo sounder-flaw detector, shock excitation generator.*

Комаров Николай Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: приборы и методы для получения и исследования материалов.

e-mail: micro.nano.electronics@ gmail.com

Войтенко Валерий Владимирович – студент кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: композиционные материалы; приборы контроля материалов.

e-mail: vlvoitenko@gmail.com

Komarov Nicolay – Ph.D. (Eng), Docent of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, s. Lugansk. Scientific interest: devices and methods for obtaining and study materials.

Voytenko Valery – student of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, s. Lugansk. Scientific interest: composite materials; devices for the control of materials.

Статья поступила

3 сентября 2017 г.

© Комаров Н.В., Войтенко В.В., 2017

**МЕТАЛЛУРГИЯ И
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Дубасов В.М., Шетилова А.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА РАБОЧЕГО СЛОЯ
ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ИСПОЛНЕНИЯ ЛПХНМд**

Dubasov V.M., Shetilova H.A.

**RESEARCH OF INFLUENCE OF CHEMICAL
ELEMENTS ON PROPERTIES OF WORKING LAYER
RENTAL ROLLERS of EXECUTION BY SRCNМd**

В современных условиях прокатного производства повышаются требования к качеству поверхности прокатной продукции и, соответственно, качеству прокатных валков. Прокатные валки, работающие в чистовых клетях листопркатных станов, должны обладать высокой износостойкостью и устойчивостью к образованию поверхностных микротрещин. Свойства прокатных валков определяются структурой чугуна. Повысить свойства чугуна можно посредством оптимизации его химического состава. Проведены исследования по влиянию химического состава на структуру и твердость рабочего слоя валков на основе промышленных данных. Определены рациональные концентрации химических элементов для улучшения эксплуатационных характеристик валков.

Ключевые слова: прокатные валки, рабочий слой, химический состав, твердость, структура, износостойкость, графитизация.

Введение

Развитие прокатного производства в сторону расширения сортамента связано с увеличением выпуска различных прокатных валков, проводков, роликов, направляющих прокатных станов. Такие детали изготавливают из чугуна, литой или деформированной стали, твердых сплавов. Прокатные валки являются основной рабочей частью прокатного стана, которая создает определенные размеры, форму и качество поверхности проката. К материалу валков предъявляют разнообразные и, часто, противоречивые требования, поэтому универсальной стали или сплава для их изготовления нет.

При производстве чугунных прокатных валков к рабочему слою предъявляются особые требования, которые обеспечивают их эксплуатационные свойства и качество проката. Вследствие особенности химического состава чугуна для прокатных валков даже небольшие изменения

свойств расплава приводит к избыточной или недостаточной графитизации и к отклонениям от заданной твердости в различных зонах отливки [1].

В общем случае материал валков должен обладать высокой поверхностной твердостью и прочностью, износостойкостью. Если валок работает в условиях теплосмен (горячая прокатка), материал должен иметь достаточную теплостойкость. При выборе чугуна в качестве материала для изготовления валка необходимо учесть тип стана, способ прокатки, производительность стана и другие технологические характеристики. Кроме прокатных, чугунные валки применяют в резинотехнической, бумагоделательной, мукомольной и других отраслях промышленности. Преимущества чугуна, как материала для их изготовления, возрастают с увеличением размеров валка. Существующие технологии производства чугунных отливок позволяют получать заготовки валков массой от 0,5 до 40 т и более [2].

Регулирование состояния металлической основы за счет легирования позволяет в достаточно широком интервале изменять износостойкость, термостойкость и обрабатываемость такого чугуна. Более глубокие внутренние слои могут не содержать карбиды, поэтому в отливке формируется несколько слоев, отличающихся структурой и свойствами. Таким образом, в поверхностном слое чугун содержит карбидную эвтектику, в более глубоких слоях углерод может выделяться в виде графита. Матрица может быть различной и зависит от состава чугуна, скорости охлаждения отливки и проведения термической обработки. В результате появления фаз с различными коэффициентами термического расширения в отливках возникают значительные внутренние напряжения. Для снятия напряжений и получения требуемых механических свойств литье подвергают термической обработке. При этом основное требование – отбеленная часть не должна претерпевать существенных изменений ни при термической обработке, ни в процессе эксплуатации.

Износостойкость и термостойкость чугуна при заданных условиях эксплуатации может колебаться в весьма широких пределах и регулируется в первую очередь природой и количеством структурных составляющих, обладающих высокой стойкостью.

Таковыми составляющими являются карбиды. В чугуне с обычным содержанием элементов наиболее распространенным является карбид железа – цементит Fe_3C . Можно считать, что износостойкость определяется твердостью чугуна с однотипным фазовым составом и чем выше твердость, тем выше износостойкость. Следует иметь в виду, что повышение твердости, как правило, сопровождается очень резким ухудшением литейных свойств, склонности к образованию трещин, обрабатываемости резанием. Поэтому при выборе марки чугуна в каждом конкретном случае следует учитывать, наряду с механическими свойствами, конфигурацию и размер отливки. Придание конструкции заготовки технологичных литейных форм, сокра-

щение объемов механической обработки, являются обязательным условием получения качественной отливок [3].

Целью работы является исследование влияния химического состава на структуру и твердость рабочего слоя прокатных валков на основе промышленных данных, определение рациональных концентраций химических элементов для улучшения эксплуатационных характеристик прокатных валков.

Методы исследования

С целью изучения влияния химического состава на структуру и твердость рабочего слоя валков ЛПХМНдц, исследовали химический состав валков и микроструктуру образцов. Образцы отобраны из рабочего слоя валков №2 и №4.

Результаты исследования

По содержанию основного элемента – углерода чугун может быть с пониженным (2,8 - 3,2 %), средним (3,2 – 3,6 %) и повышенным (3,6 – 3,8 %) углеродом. С увеличением содержания углерода уменьшается глубина отбела, одновременно сокращается глубина переходной зоны. Повышенное содержание углерода увеличивает твердость, износостойкость и чистоту валков, однако в ряде случаев рекомендуется снижать углерод (валки для горячей прокатки, жестепрокатные валки, рифленые валки). Повышенное содержание углерода снижает прочность, так как при этом растет количество графита во внутренних слоях и повышенное содержание хрупкого цемента в поверхностных. Глубина отбеленного слоя на валках различных типов составляет 10 – 40 мм. Количество цемента в поверхностном слое доходит до 50 %, наиболее распространенные марки чугуна имеют 25 – 30 % карбидов. Дисперсность карбидов зависит от состава чугуна и скорости охлаждения поверхности отливки. Обычно размер карбидов 4 – 12 мкм, длина может быть в несколько раз больше. Чем выше степень дисперсности карбидов, тем выше износостойкость. Однако с ростом количества карбидов в поверхностном слое падает термостойкость вала.

Выделяют глубину чистого отбела, которая соответствует расстоянию от поверхности вала до первого серого пятна на макрошлифе – скопления зерен графитной эвтектики. Глубина переходной зоны определяется расстоянием от этого пятна до места полного исчезновения белых пятен, т.е. отдельных видимых невооруженным глазом скоплений цементитной эвтектики.

Рекомендованный химический состав чугуна для отбеленных прокатных валков приведен в табл. 1 [1].

**Химический состав чугуна для прокатных валков
с отбеленным рабочим слоем, мас. %**

Структура в рабочем слое	C	Si	Mn	Cr	Ni
Перлитно-цементитная	2,8-3,8	0,2-0,8	0,3-0,9		
Перлитно-цементитная	3,0-3,6	0,5-0,9	0,4-0,8		
Сорбито-цементитная	2,8-3,8	0,2-0,9	0,4-1,0		
Троостито-цементитная	2,8-3,8	0,2-0,2	0,4-1,0		
Мартенситная	2,8-3,8	0,1-0,7	0,4-1,0		

Примечание. Содержание фосфора ограничено $< 0,50$ %; серы в не модифицированном чугуне $< 0,12$ %; в модифицированном $< 0,02$ % S.

Твердость зависит от содержания углерода и других элементов, а также размеров заготовки (рис. 1). Приведены значения динамической твердости по Шору, которую часто используют при контроле качества валков. При содержании углерода более 3,8 % твердость поверхностного слоя начинает падать. Для неметаллургических валков используют аналогичные чугуны, однако содержание углерода в них поддерживают на уровне 3,4 - 3,7 %, а хром и никель ограничивают до 0,45 % и 0,5 - 0,8 %, соответственно. Недопустимо выделение графита в поверхностных слоях, так как в этом случае резко падает износостойкость и качество поверхности вала.

Влияние углерода на твердость и другие свойства поверхностного слоя нельзя рассматривать без учета влияния остальных элементов.

Кремний в чугунах является наиболее сильным графитизатором после углерода. При отливке отбеленных валков и с учетом строго регламентированного содержания других элементов, содержанием кремния регулируют глубину отбеленного слоя и переходной зоны. При уменьшении содержания кремния отбел возрастает, а переходная зона распространяется на большую глубину.

Содержание марганца в отбеленных валках для холодной прокатки и дрессировки рекомендовано повышать до 3 – 4 %. При таком содержании марганца повышается твердость поверхности, после шлифовки валок приобретает зеркальную поверхность. Более высокое содержание марганца ведет к охрупчиванию рабочего слоя.

Хром, являясь сильным карбидообразующим элементом, сильно повышает глубину отбеленного слоя и повышает его твердость. При содержании хрома, указанном в табл. 1 (< 5 %), он растворяется в цементите, повышая его стабильность. Образуется карбид типа $(Fe, Cr)_3C$. С увеличением содержания хрома последовательно образуются карбиды $(Cr, Fe)_7C_3$, Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$. Заметное влияние хром оказывает на матрицу чугуна. Хром

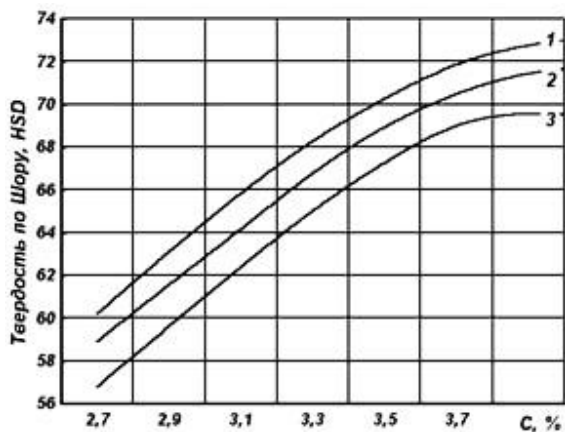


Рис. 1. Влияние содержания углерода на твердость рабочего слоя валков различного диаметра: 1 – 250 – 350 мм; 2 – 400 – 600 мм; 3 – свыше 600 мм

и никель увеличивают устойчивость переохлажденного аустенита, особенно сильно устойчивость аустенита растет при их совместной добавке. По мере увеличения легирования хромом и никелем структура в поверхностном слое переходит последовательно в сорбитную, трооститную, мартенситно-аустенитную и промежуточную (бейнитную). При таких изменениях твердость и износостойкость валков повышается. Валки с карбидно-мартенситной структурой из легированного чугуна сохраняют вязкость и прочность при повышенных температурах. Благодаря этому из такого чугуна можно отливать валки для высокопроизводительных станов горячей прокатки [4].

Несмотря на допустимое содержание серы до 0,12 %, весьма желательно ее снижать. Сера несколько повышает отбел, но резко ухудшает основные механические свойства, особенно при высоких температурах. Это в целом снижает стойкость валков (рис. 2). Для нейтрализации вредного влияния серы необходимо не менее 0,45 – 0,50 % Mn. При содержании марганца более 1,5 % влияние серы не выражено.

Литейные свойства легированных чугунов для валков хуже, чем у обычных чугунов. Жидкотекучесть хромистых чугунов почти не уступает жидкотекучести серых чугунов (230-450 мм), линейная усадка выше – до 1,8-2,0 %, и близка к усадке стали.

Содержание химических элементов в рабочем слое валков ЛПХНдц, отлитые на Лутугинском заводе прокатных валков, приведены в табл. 2.

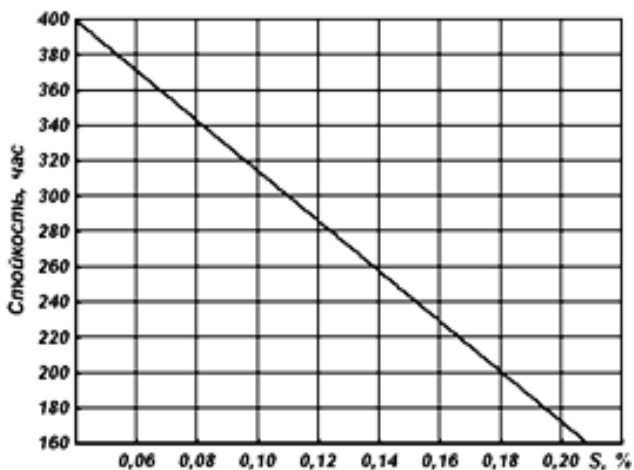


Рис. 2. Влияние серы на стойкость чугуна

Т а б л и ц а 2

Химический состав прокатных валков ЛПХНди №2 и №4, мас. %

№ валка	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
4	3,08	0,69	0,66	0,09	0,05	1,55	4,52	0,3
2	3,16	0,68	0,76	0,09	0,05	1,66	4,48	0,31

Учитывая практически линейный характер влияния ванадия на структуру и твердость индифинитного чугуна в изученном интервале авторами работы [5], можно прогнозировать изменение свойства чугуна при содержании ванадия более 0,15% и порекомендовать легирование 0,15-0,20V%. Для изучения влияния ванадия при более высоком его содержании необходимы дополнительные исследования.

Изучение влияния ниобия и теллура требует дополнительных исследований.

Бор, даже при малых концентрация его в чугуне, оказывает существенное влияние. По результатам исследований введение 0,010% В, бор окажет положительное влияние на износостойкость валков [5]. Необходимы более подробные исследования влияния бора на свойства чугуна.

Выводы

Проведение исследования в рассмотренных интервалах концентраций химических элементов позволяет уточнить химический состав чугуна с целью повышения износостойкости.

Углерод, проявляющий карбидообразующее действие при содержании 3,10%, с учетом обеспечения необходимого количества графита должен находиться в интервале 3,15-3,25%.

Кремний, являющийся графитизатором, должен быть минимальным в исследованных пределах 1,05-1,10%.

Марганец является карбидообразующим элементом, способствует увеличению доли остаточного аустенита, следует ограничить в интервале 0,9-0,95%.

Хром, оказывающий сильное карбидообразующее действие, должен находиться в интервале 1,75-1,80%.

Никель, оказывающий решающее влияние на формирование мартенситно-бейнитной матрицы, должен находиться в интервале 4,40-4,45%.

Молибден при содержании в пределах 0,35-0,40% обеспечит повышение износостойкости и получение необходимого количества графита.

На основании сделанных выводов можно скорректировать химический состав валков, отливаемых на Лотошинском заводе прокатных валков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скобло Т. С. , Воронцов Н. М., Рудюк С. И. Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов. М.: Металлургия, 1994. 336 с.
2. Будагьянц Н. А., Карсский В. Е. Литые прокатные валки. М.: Металлургия, 1983. 175 с.
3. Гималетдинов Р. Х. Производство прокатных валков из высококачественных чугунов. М.: Полтекс, 2000. 329 с.
4. Гималетдинов Р. Х., Гулаков А. А., Тухватулин И. Х. Влияние химического состава на свойства рабочего слоя центробежно-литых индифинитных прокатных валков // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 3 С. 78-88.
5. Автухов А. К. Исследование влияния продувки азотом на формирование структуры металла рабочего слоя прокатных валков исполнения ЛПХНМдц. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал . 2015. Том.3. №4. С. 9-11.

Dubasov V. M., Shetilova H. A. Research of influence of chemical elements on properties of working layer rental rollers of execution by SRCNМd.

In the modern terms of rental production rise requirement to quality of surface of rental products and, accordingly, to quality of rental rollers. The rental felling working in the clean cages of sheet rental figures must possess high wearproofness and stability to formation of superficial microcracks. Properties of rental rollers are determined by the structure of cast-iron. Promoting properties of cast-iron is possible by means of optimization of him химическогосостава. Researches is conducted on influence of chemical composition on a structure and hardness of working layer of rollers on the basis of industrial data. The rational concentrations of chemical elements are certain for the improvement of operating descriptions of rollers.

Keywords: *rental felling, working layer, chemical composition, hardness, structure, wearproofness, graphitization.*

Дубасов В. М. – канд. техн. наук, доцент Луганского национального университета им. В. Даля, г. Луганск. Научные интересы: совершенствование технологических процессов в металлургии.

e-mail: dubasov1955@mail.ru.

Шетилова А.А. студентка группы ИМ-951м института инженерной механики Луганского национального университета им. В. Даля, г. Луганск.

e-mail: shetilovaanya@mail.ru.

Dubasov V. M. is Candidate of Technical Sciences, the associate professor of the Luhansk national university of V. Dahl, Luhansk. Scientific interests: improvement of technological processes in metallurgy.

e-mail: dubasov1955@mail.ru.

Shetilova H. A. student of group IM-951m institute of engineering mechanics of the Luhansk national university the name of V. of Дaля, Luhansk. Scientific interests: improvement of technological processes in metallurgy.

e-mail: shetilovaanya@mail.ru.

Статья поступила

8 сентября 2017 г.

© Дубасов В.М., Шетилова А.А. 2017

УДК 621.7.044.4

Решетняк Д.В.

УСИЛЕНИЕ КУМУЛЯТИВНОГО ЭФФЕКТА ПРИ КОЛЛАПСЕ ПОСЛЕРАЗРЯДНОЙ КАВЕРНЫ ВНЕШНИМ АКУСТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

Reshetnyak D.V.

AMPLIFICATION OF THE CUMULATIVE EFFECT IN THE COLLAPSE OF THE POST-DISCHARGE CAVERN BY AN EXTERNAL ACOUSTIC FIELD

В данной работе разработана математическая модель, которая описывает динамику сферической послеразрядной полости в воде и учитывает кинетику основных процессов, определяющих параметры состояния содержимого каверны при ее эволюции в поле переменного давления. Исследуется влияние низкочастотной акустической волны на динамические характеристики полости, параметры состояния газа в ней на стадии коллапса.

На основе результатов тестового моделирования показана перспективность стимулирования кумулятивного эффекта при коллапсе каверны переменным внешним полем для его использования в различных технологиях обработки материалов импульсами давления большой амплитуды.

Ключевые слова: электрогидравлический эффект, обработка материалов, ударная волна, послеразрядная полость, математическая модель, динамика, коллапс, параметры состояния.

Введение

Высоковольтный разряд в воде вызывает ее термическое разложение в межэлектродном промежутке и образование частично ионизированной водородно-кислородной плазмы, через которую проходит ток, т.е. возникает разрядный канал [1]. Разогрев плазмы разрядным током до температуры $\sim 10^4$ К приводит к интенсивному испарению прилегающей жидкости в полость канала, а резкое повышение давления в канале вызывает его быстрое расширение. При этом в жидкость излучается мощный импульс сжатия, способный преобразоваться в ударную волну (УВ). После завершения энерговыделения образовавшийся плазменный

пузырек продолжает расширяться сначала под действием избыточного давления, а затем благодаря инерции жидкости до некоторого максимального размера. На этой стадии резко уменьшается температура содержимого полости. К концу расширения давление в полости становится гораздо меньше гидростатического, и она начинает схлопываться. Этот процесс сопровождается конденсацией пара на ее стенке. В конце стадии сжатия температура и давление в полости снова резко возрастают, что приводит к излучению второго импульса сжатия и световой вспышки из коллапсирующего пузырька [2]. При постоянном гидростатическом давлении длительность стадий расширения и схлопывания полости будет примерно одинакова.

Создание с помощью разряда импульсного гидравлического давления $\sim 10^4 \div 10^5$ атм и нестационарных гидротоков в окрестности электрического пробоя жидкости (электрогидравлический эффект) нашло широкое практическое применение в металлообработке, технологии машиностроения, горном деле, строительстве, химических технологиях, медицине (литотрипсия) и др. [3]. В частности, в металлообработке и машиностроительных технологиях применяются, разработанные на основе ЭГ-эффекта, методы штамповки металлов, снятия внутренних напряжений, поверхностного упрочнения или наклепа металлических изделий, формования порошковых материалов, очистки изделий и др.

Поскольку ЭГ-эффект непосредственно связан с электрическим пробоем жидкости в межэлектродном промежутке, то основное внимание в исследованиях электрического разряда в воде уделялось его активной и предпробойной стадиям [1,4,5].

Если обеспечить сферически симметричное схлопывание полости без ее фрагментации, то гидродинамическое возмущение при коллапсе, может иметь энергию, сравнимую с энергией УВ, излучаемой на канальной стадии разряда [6]. Величина вторичной волны сжатия зависит от давления внутри пузырька на финальной стадии схлопывания [7]. Оно, в свою очередь, определяется динамикой полости и процессами, происходящими в ней на послеразрядной стадии.

Воздействуя на каверну полем внешнего давления, которое изменяется по оптимально подобранному закону, можно добиться значительного относительного укорочения фазы ее схлопывания (увеличения скорости сжатия). Это должно привести к усилению коллапса, повышению концентрации энергии пузырьком и генерации им более мощного импульса давления, который имел бы практическую значимость наряду с УВ, излучаемой при разряде. Например, в работе [8] было показано, что воздействуя акустическим импульсом на пузырек, созданный лазерным пробоем в воде, можно добиться более чем двукратного увеличения светового потока из него на стадии коллапса.

Исследования по акустическому воздействию на каверну, инициированную искровым пробоем жидкости (см. [9]) необходимы для разработки новых электрогидравлических генераторов УВ. Устройства, работа которых основана на комбинации электрогидравлического эффекта и последующего акустического стимулирования имплозии полости должны быть более эффективны за счет излучения мощной волны сжатия также и при коллапсе каверны. Оптимизация параметров разряда и акустического воздействия при создании таких устройств требует адекватного теоретического описания процессов в послеразрядной каверне.

Длительность первой пульсации сферической полости, созданной электрическим разрядом, можно оценить по формуле Виллиса $\tau_p \approx 1.14 \rho_0^{1/2} E_0^{1/3} P_0^{-5/6}$ [1], где $\rho_0 = 998 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; $P_0 = 1 \text{ атм}$ – гидростатическое давление. Так, для каверны, инициированной разрядом с энергией $E_0 = 1 \div 100 \text{ Дж}$, будет $\tau_p \sim 10^{-3} \text{ с}$. Поэтому, для эффективного воздействия на послеразрядную полость с целью усиления жесткости коллапса необходима волна сжатия с аналогичным периодом. Импульсы давления длиннее $\sim 10^{-5} \text{ с}$ генерировать технически затруднительно. Поэтому для воздействия на каверну целесообразно использовать непрерывную акустическую волну с частотой $\nu \leq 1/\tau_p \sim 10^2 \div 10^3 \text{ Гц}$. При помощи управляющей электронной схемы момент зажигания разряда должен быть синхронизирован с акустическим полем так, чтобы стадия расширения каверны приходилась, в основном, на действие полуволны растяжения, схлопывание каверны – на полуволну сжатия.

Целью данной работы является разработка пригодной для практического использования математической модели эволюции сферической послеразрядной каверны в воде. При этом модель должна описывать кинетику основных процессов, которые определяют параметры состояния содержимого каверны. Далее с помощью модели необходимо исследовать влияние переменного акустического поля на динамические характеристики и параметры состояния содержимого пузырька на стадии коллапса.

Математическая модель

При описании параметров состояния газа, химической кинетики в каверне, ее теплообмена с окружающей водой будем считать содержимое полости температурно и химически однородным за исключением переходного пристеночного слоя газа толщиной $\delta_g \ll R$, в котором температура линейно снижается от температуры газа в полости T_g до тем-

пературы ее поверхности T_R . Подобная схема гомогенного кавитационного пузырька приведена, например, в [10].

Вследствие отвода тепла от поверхности полости потоком воды, а также ее высокой теплопроводностью $\lambda_l \gg \lambda_g$, можно принять, что температура стенок каверны примерно соответствует температуре окружающей воды $T_R \approx T_{l0}$. В данной работе принято значение $T_{l0} = 293$ К.

1. Для расчета динамики радиальных пульсаций каверны, используем уравнение Киркувуда-Бете [11], которое учитывает сжимаемость жидкости и может описывать около- и сверхзвуковую стадию движения пузырьковой стенки:

$$\left(1 - \frac{U}{C}\right)R \frac{dU}{dt} + \frac{3}{2}\left(1 - \frac{U}{3C}\right)U^2 = \left(1 + \frac{U}{C}\right)H + \left(1 - \frac{U}{C}\right)\frac{R}{C} \frac{dH}{dt}, \quad (1)$$

где R – текущий радиус пузырька; $U = dR/dt$ – скорость его стенки; C , H – скорость звука в воде и свободная энтальпия на поверхности пузырька. Скорость звука $C = c_R$ определяется давлением в жидкости на поверхности полости P_R :

$$C = c_0 \left(\frac{P_R + B}{P_0 + B} \right)^{(n-1)/2n}, \quad P_R = P_g - 2\sigma/R - 4\mu U/R,$$

где c_0 – скорость звука в невозмущенной воде; P_g – давление парогазовой смеси (ПГС) в полости; σ , μ – коэффициенты поверхностного натяжения и динамической вязкости воды; $B = 3045$ атм, $n = 7.15$ – константы уравнения состояния Тэйта для воды. Свободная энтальпия определяется выражением:

$$H = \frac{n(P_0 + B)^{1/n}}{(n-1)\rho_0} \left[(P_R + B)^{(n-1)/n} - (P_0 + B + P_a)^{(n-1)/n} \right]$$

в котором величина P_a соответствует переменному акустическому давлению. Давление ПГС в полости зададим уравнением состояния вида:

$$P_g = \frac{R_u T_g \sum_i v_i}{V - \sum_i v_i b_i}, \quad (2)$$

где v_i , b_i – количество молей и постоянные отталкивания в уравнении Ван-дер-Ваальса индивидуальных компонентов смеси; R_u – универсальная газовая постоянная.

2. Скорость фазовых переходов j_v при испарении и конденсации пара на межфазной границе может быть задана уравнением Герца-Кнудсена-Ленгмюра:

$$j_v = \alpha \sqrt{\frac{M_{H_2O}}{2\pi R_u T_R}} (P_s - P_v),$$

где α – коэффициент аккомодации молекул пара на стенке полости; M_{H_2O} – молярная масса воды; P_s – давление насыщенного пара, соответствующее температуре поверхности T_R ; P_v – давление пара на стенку пузырька. Поток молекул пара через поверхность полости определяется как $G_v^S = 4\pi R^2 j_v / m_{v1}$, где m_{v1} – масса молекулы воды.

3. В процессе эволюции каверны в ней будут протекать химические реакции между компонентами ПГС. Химические превращения сопровождаются выделением или поглощением тепла, кроме того они приводят к изменению теплоемкости содержимого каверны. Таким образом, химическая кинетика в газовой фазе влияет на энергетический баланс пузырька и, следовательно, термодинамические условия внутри него. В данной работе в кинетическую схему включены основные 16 реакций с участием H, O, OH, H₂, O₂, H₂O и HO₂ (табл. 1). Скорости прямых и обратных реакций определяются кинетическими уравнениями:

для реакций типа $A+M \leftrightarrow B+C+M$: $r_{f,j} = k_{f,j} n_{tot} n_A$, $r_{b,j} = k_{b,j} n_{tot} n_B n_C$,

для реакций типа $A+B \leftrightarrow C+D$: $r_{f,j} = k_{f,j} n_A n_B$, $r_{b,j} = k_{b,j} n_C n_D$,

где $k_{f,j}, k_{b,j}$ – показатели скорости прямой и обратной реакции; n_{tot} – полная концентрация частиц в полости; n_A, n_B, n_C, n_D – концентрации частиц сорта A, B, C и D; M – любая частица.

Таблица 1

Реакции в парогазовой смеси

1. O+O+M \leftrightarrow O ₂ +M	9. OH+OH \leftrightarrow H ₂ +O ₂
2. O+H+M \leftrightarrow OH+M	10. H+O ₂ +M \leftrightarrow HO ₂ +M
3. O+H ₂ \leftrightarrow H+OH	11. H ₂ +O ₂ \leftrightarrow HO ₂ +H
4. H+O ₂ \leftrightarrow O+OH	12. OH+OH \leftrightarrow HO ₂ +H
5. H+H+M \leftrightarrow H ₂ +M	13. OH+O ₂ \leftrightarrow HO ₂ +O
6. H+OH+M \leftrightarrow H ₂ O+M	14. H ₂ O+O ₂ \leftrightarrow HO ₂ +OH
7. OH+H ₂ \leftrightarrow H+H ₂ O	15. H ₂ O+O \leftrightarrow H+HO ₂
8. OH+OH \leftrightarrow O+H ₂ O	16. H ₂ O+OH \leftrightarrow H ₂ +HO ₂

4. Давление в полости (2) определяется температурой и концентрацией ПГС. Температура содержимого пузырька, согласно [12] может быть найдена из первого закона термодинамики $dT_g/dt = W_b/C_V^b$, где W_b – ско-

рость изменения полной энергии пузырька, C_v^b – изохорная теплоемкость ПГС в нем. Величина W_b включает в себя:

- 1) тепловой поток через поверхность полости $W_R = dQ_R/dt$;
- 2) изменение работы, совершаемой пузырьком $W_A = P_g dV/dt$;
- 3) изменение энергии при испарении (конденсации) водяного пара на стенках полости $W_v = e_v G_v^S$, где $e_v \approx 4kT_{l0}$ – энтальпия, приходящаяся на молекулу воды при фазовом переходе [12];
- 4) изменение внутренней энергии ПГС вследствие изменения ее состава:

$$W_u = kT_g \sum_i \left(\frac{f_i}{2} + \sum_l \frac{\theta_{i,l}/T_g}{\exp(\theta_{i,l}/T_g) - 1} \right) \frac{dN_i}{dt},$$

где f_i – число степеней свободы молекулы i -го сорта, $\theta_{i,l}$, N_i – характеристические колебательные температуры молекул i -го сорта и их количество в полости;

5) мощность тепловыделения, обусловленную химическими реакциями в полости $W_c = V \sum_j r_j \Delta e_j$, где $r_j = r_{f,j} - r_{b,j}$ и Δe_j – результирующая скорость

и тепловой эффект j -ой реакции.

С учетом знаков процессов, уравнение энергетического баланса полости, используемое для расчета температуры ПГС в ней, будет:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{W_R - W_A + W_v - W_u + W_c}{C_v^b}. \quad (3)$$

Теплоемкость ПГС с учетом ее колебательных составляющих определяется выражением:

$$C_v^b = k \sum_i \left(\frac{f_i}{2} + \sum_l \frac{(\theta_{i,l}/T_g)^2 \exp(\theta_{i,l}/T_g)}{(\exp(\theta_{i,l}/T_g) - 1)^2} \right) N_i.$$

5. Для численного решения системы уравнений (1), (3) и 7 уравнений, определяющих концентрацию каждого компонента ПГС в полости, необходимо задать начальные условия. В качестве первоначального радиуса полости R_0 примем радиус плазменного пузырька в момент окончания разряда τ , который оценим из выражения для внутренней энергии пузырька $W_0 = (1 - \eta_d) \eta_k E_0 = P_c V_0 / (\gamma - 1)$, где $\gamma \approx 1.26$ – эффективный показатель адиабаты плазмы, образованной из воды [1]. К моменту окончания разряда,

давление в пузырьке будет $P_c = \rho_0 R_0^5 / \tau^2$ [1], его объем $V_0 = 4/3\pi R_0^3$, поэтому для начального радиуса получим:

$$R_0 = \left[\frac{3(\gamma - 1)}{4\pi\rho_0} (1 - \eta_d) \eta_k E_0 \tau^2 \right]^{1/5}.$$

Коэффициент η_d учитывает суммарные потери энергии в подводящих проходах, на световое излучение, излучение ударной волны и пр. Эти потери составляют от 30 до 50 % энергии конденсатора [4], мы для определенности будем считать $\eta_d = 0.4$. Коэффициент $\eta_k \approx 0.5$ показывает долю энергии, выделившейся в канале, которая переходит во внутреннюю энергию плазмы [1]. Скорость стенки полости к окончанию разряда оценим как $U_0 = R_0 / \tau$ [1]. Температуру содержимого пузырька к моменту окончания энерговыделения примем $T_{g0} = 10^4$ К [1].

В данной работе интегрирование системы ОДУ, на которой основана описанная модель, проводится численным методом для решения жестких систем ДУ Isode[backfull], входящим в СКМ Maple.

Результаты исследований

Проведем тестовые расчеты для каверны, инициированной разрядом в воде с энергией $E_0 = 5$ Дж и эффективной длительностью $\tau = 2$ мкс. Начальные радиус и скорость стенки плазменного пузырька, созданного таким разрядом к окончанию энерговыделения составят, соответственно ≈ 0.8 мм и 410 м/с.

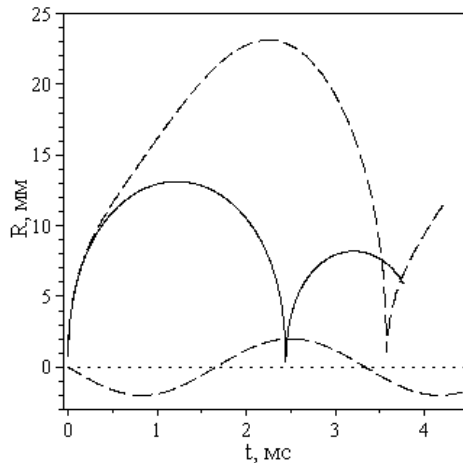


Рис. 1. Динамика послеразрядной полости

На рис. 1 приведены результаты моделирования динамики таковой полости в отсутствие дополнительного акустического поля (сплошная линия) и в поле синусоидальной волны с амплитудой $P_a = 2$ атм и частотой $\nu = 300$ Гц (пунктир). Действующая сначала полуволна растяжения приводит к значительно большему росту полости и массы пара в ней. После этого полуволна сжатия ускоряет схлопывание каверны. При этом пар не успевает сконденсироваться на стенке полости, что вызывает многократный рост пиковых значений давления и плотности ПГС в коллапсе (табл. 2). При увеличении частоты волны происходит ее рассинхронизация с динамикой полости, полость расширяется до меньшего размера, внешнее поле уже не способствует ее быстрому сжатию и пиковые значения параметров состояния ПГС уменьшаются. Минимальный радиус пузырька во всех случаях $R_{min} \approx 0.3$ мм.

Таблица 2

Пиковые значения параметров на стадии коллапса каверны

ν , Гц	R_{max}/R_{min}	P_g , атм	ρ_g , г/см ³
100	151.2	$7 \cdot 10^5$	0.25
200	105	$3.5 \cdot 10^5$	0.216
300	92.5	$1.7 \cdot 10^5$	0.18
400	75	$5.2 \cdot 10^4$	0.13
без поля	43.7	$1.2 \cdot 10^4$	0.065

Выводы

Приведенные результаты тестового моделирования демонстрируют эффект увеличения давления в пузырьке на стадии коллапса более чем на порядок при воздействии на него синхронизированной акустической волны низкой частоты. Излучаемые в воду волны сжатия от таких полостей могут иметь практическое применение в различных технологиях обработки материалов импульсным давлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 156 с.
2. Беньковский В.Г., Голубничий П.И., Масленников С.И. Импульсы электрогидродинамической сонолюминесценции, сопровождающей высоковольтный электрический разряд в воде // Акуст. журн. 1974. Т. 20, вып. 1. С. 23-26.
3. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
4. Иванов В.В., Швец И.С., Иванов А.В. Подводные искровые разряды. Киев: Наук. думка, 1982. 192 с.

5. Ушаков В.Я. и др. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во науч. техн. лит., 2005. 487 с.
6. Поздеев В.А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости. Киев: Наук. думка, 1980. 192 с.
7. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
8. G. Sankin, R. Mettin, O. Lindau, B. Wolfrum, W. Lauterborn, V.S. Teslenko. Laser induced cavitational luminescence in a bipolar acoustic pulse wave // The Journal of the Acoustical Society of America. 2001. V. 110, No. 5, p. 2733.
9. Сулимов Б.К. Динамика электровзрывной каверны в жидкости в поле внешнего переменного давления: Дисс. канд. техн. наук: 05.14.12. Караганда, 1998.
10. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука, 1987. 464 с.
11. Акуличев В.А. Пульсации кавитационных полостей / в кн. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. С. 128-165.
12. Toegel R., Gompf B., Pecha R., Lohse D. Does water vapor prevent upscaling sonoluminescence? // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85, N 15. P. 3165-3168.

Reshetnyak D.V. Amplification of the cumulative effect in the collapse of the post-discharge cavern by an external acoustic field

In this paper, a mathematical model is developed that describes the dynamics of a spherical post-discharge cavern in water. The model involves the kinetics of the main processes that determine the parameters of the state of the cavern's matters during its evolution in the field of variable pressure. We research the influence of a low-frequency acoustic wave on the dynamic characteristics of the cavity, the parameters of the state of the gas in it at the stage of collapse.

The results of the test simulation showed the perspective of stimulating the cumulative effect in the collapse of the cavern by an irregular external field. This can be used in various technologies for processing materials by high-amplitude pressure pulses.

Keywords: *electro-hydraulic effect, material processing, shock wave, post-discharge cavity, mathematical model, dynamics, collapse, state parameters.*

Решетняк Денис Вадимович – старший преподаватель кафедры материаловедения Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: компьютерное моделирование процессов.

e-mail: denres@mail.ru

Reshetnyak Denis – senator teacher Material Department, Vladimir Dalh Lugansk National University, Lugansk. Scientific interest: computer simulation of processes.

e-mail: denres@mail.ru

*Статья поступила
25 сентября 2017 г.
© Решетняк Д.В. 2017*

Алимов В.И., Генкузина В.О.

АНИЗОТРОПИЯ ДИФФУЗИОННЫХ ПОТОКОВ ПРИ ТВЁРДОФАЗНОМ НАУГЛЕРОЖИВАНИИ ДЕФОРМИРОВАННОЙ СТАЛИ

Alimov V.I., Genkuzina V.O.

ANISOTROPY OF DIFFUSION IN THE SOLID STATE CARBURIZATION OF DEFORMED STEEL

Исследования выполняли на образцах, имеющих разную степень обжатия, и изготовленных из горячекатаного проката из низкоуглеродистой стали. Изучали микроструктуру, микротвёрдость и параметры кристаллической решетки при насыщении углеродом предварительно деформированной стали. Получена глубина науглероженного слоя в зависимости от направления насыщения и степени обжатия при прокатке, а также коэффициент диффузии углерода в аустените низкоуглеродистой стали в зависимости от направления насыщения и степени обжатия при прокатке. Установлена анизотропия параметров науглероживания низкоуглеродистой стали, деформированной холодной прокаткой, что может быть использовано для управления насыщением элементами при химико-термической обработке металлических изделий.

Ключевые слова: анизотропия деформированной стали, химико-термическая обработка, диффузионные потоки, структура, науглероживание, микротвёрдость, характеристики тонкой кристаллической структуры.

Введение

В многофазных деформированных сплавах predetermined анизотропия ряда свойств: прочности, пластичности, ударной вязкости, коррозионной стойкости и др.; особенно это представляет интерес для интенсивно деформирующихся изделий сложной формы. В общем случае можно рассматривать диффузионные потоки как при диффузионном насыщении, так и при диффузионном удалении элементов. Насыщение поверхности изделия различными элементами обусловлено прямым диффузионным потоком. Обратный диффузионный поток реализуется при удалении элементов из приповерхностного слоя изделия [1].

К химико-термической обработке (ХТО) традиционно относят лишь поверхностное насыщение стали соответствующим элементом

(например, углеродом, азотом, алюминием, хромом и др.) путем его диффузии в атомарном состоянии из внешней среды при высокой температуре. В отличие от термической обработки при химико-термической обработке меняется не только структура, но и химический состав поверхностных слоев, что позволяет в более широких пределах изменять его свойства [1-3].

В процессе химико-термической обработки поверхностный слой металла приобретает столбчатую структуру. В случае последующего диффузионного удаления элементов структура поверхностного слоя будет состоять из столбчатых зерен феррита. Данная структура поверхностного слоя имеет ряд недостатков, одним из которых является возникновение трещин при интенсивной деформации металла сжатием. В связи с этим возникает необходимость контролировать качество поверхностного слоя во избежание преждевременного выхода из строя изделий.

Для контроля качества поверхностного слоя интенсивно деформирующихся металлических изделий после проведения ХТО с обратным диффузионным потоком можно применить метод холодной осадки. Испытание на осадку позволяет выявить и классифицировать такие дефекты как раскатанные пузыри, закаты, трещины, риски и т.д. Дефекты, имеющие значительную глубину, раскатываются при осадке. Годным считается металл, на образцах которого после осадки не обнаруживаются дефектов, выходящих за пределы требований технических условий. Испытание на осадку дает представление о качестве диффузионного слоя и пригодности стали к деформации.

Таким образом, направленные диффузионные потоки играют важную роль для интенсивно деформирующихся изделий. Применяя диффузионное насыщение различными элементами можно добиться упрочнения поверхностного слоя, улучшения сопротивления различным видам нагрузок, а, следовательно, и увеличению срока эксплуатации изделий. Но последующее диффузионное удаление элементов уменьшает способность противостоять деформациям при сжатии и, как следствие, изделие преждевременно выходит из строя и разрушается.

Целью исследования является оценка анизотропии диффузионных характеристик при насыщении углеродом предварительно деформированной стали.

Методика исследования

Исследования проводили на низкоуглеродистой стали с содержанием, % масс.: 0,19 С, 0,47 Мн, 0,26 Si, 0,029 S, 0,031 Р (другие элемен-

ты – Cr, As, Cu и тд. – в пределах допустимых по ГОСТ 1050-88 для углеродистых качественных сталей).

Исходные образцы, изготовленные из горячекатаного проката, имели форму, позволяющую на одном образце получать участки с разными степенями обжатия при прокатке (рис. 1). Ранее на сталях разных химических составов подобные эксперименты проводили при деформировании осадкой на гидравлическом прессе [1].



Рис. 1. Исходный образец для прокатки с варьированием степени обжатия по длине раската: 1 – 65%, 2 – 20%, 3- 0%

Прокатку проводили вхолдную на стане ДУО 100 в лаборатории деформационно-термической обработки и коррозионных исследований кафедры «Физическое материаловедение» ДонНТУ. По длине раската фиксировали участки со степенями обжатия 0; 20 ± 3 ; 65 ± 3 %; степень обжатия оценивали по изменению толщины соответствующего участка образца. Из раската вырезали образцы для изучения характеристик вдоль и поперек направления прокатки, как показано на рис. 2.

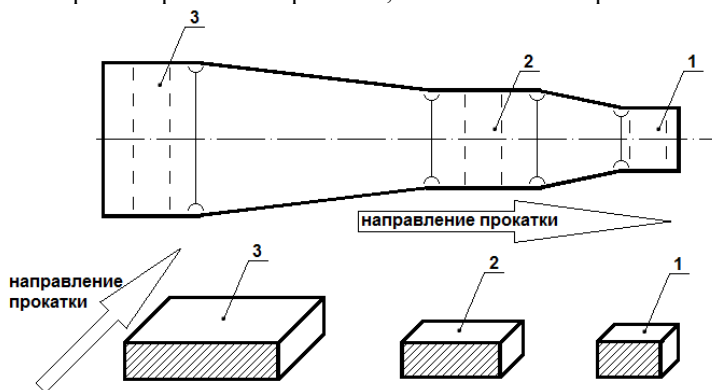


Рис. 2. Схема раската в плане - а и вырезанных из него образцов - б для изучения характеристик вдоль и поперек направления прокатки

Результаты исследования

После прокатки наблюдали типичную микроструктуру низкоуглеродистой холоднодеформированной стали (рис. 3): вытянутые в направлении прокатки «строчки» из перлитных колоний и зерен феррита; утонение полосок перлитной составляющей и феррита возрастает по мере увеличения обжатия.

Оценку микротвердости производили путем измерений на микротвердомере ПМТ-3, а параметров тонкой кристаллической структуры – по рентгенограммам, полученным съемкой на аппарате ДРОН: результаты приведены в табл. 1.

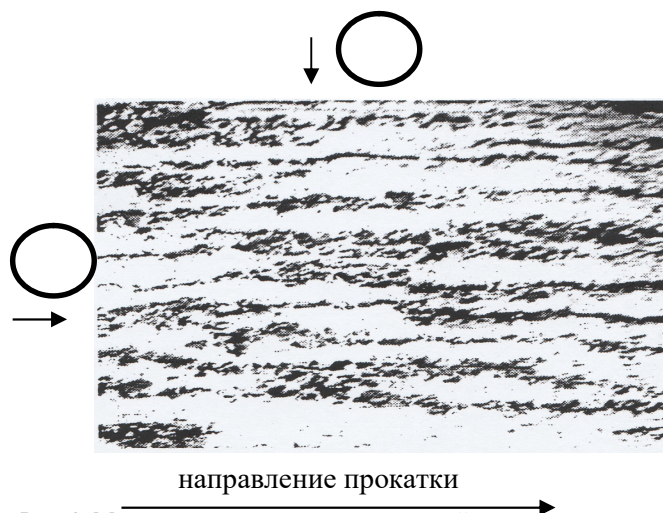


Рис. 3. Микроструктура низкоуглеродистой стали в плоскости, параллельной направлению прокатки с вариантами насыщения: I – поперек полос структурных составляющих; II - вдоль направления прокатки ($\times 225$)

Т а б л и ц а 1

Микротвердость и параметры тонкой кристаллической структуры низкоуглеродистой стали в зависимости от степени обжатия при прокатке

Обжатие при прокатке, %	Микротвердость Н _п , Н/мм ² $\times 10^3$	Микроискажения, $\frac{\Delta a}{a} \times 10^{-4}$	Области когерентного рассеяния, $D \times 10^{-5}$, см	Плотность дислокаций, $\rho \times 10^{10}$, см ⁻²
0	1,65	5,1	3,9	5,1
20	3,45	6,2	3,2	9,1
65	4,35	9,7	2,1	12,5

Видно, что микротвердость с увеличением степени обжатия при прокатке возрастает, что является следствием повышения уровня микрорискажений и плотности дислокаций и измельчения областей когерентного рассеивания.

Насыщение углеродом в стандартном карбюризаторе на основе древесного угля проводили по стандартной методике. За глубину насыщенного слоя принимали расстояние от поверхности до зоны, содержащей порядка 50% перлита (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Глубина науглероженного слоя в зависимости от направления насыщения и степени обжатия при прокатке

Обжатие при прокатке, %	Глубина науглероженного слоя, мкм	
	насыщение в направлении прокатки	насыщение перпендикулярно направлению прокатки
0	1120	880
20	1190	900
65	1280	920

Видно, что науглероживание в направлении прокатки происходит интенсивнее на 25-30%, чем в перпендикулярном направлении; увеличение степени обжатия, во всяком случае в изученных пределах, способствует увеличению глубины насыщения.

Для расчетов коэффициента диффузии углерода в аустените D (в этом структурном состоянии производили науглероживание) принимали следующие условия:

- концентрация углерода в исходном состоянии $C_{исх}=0,19\%$;
- концентрация углерода на поверхности после науглероживания $C_{нов}=0,95\%$;
- длительность насыщения $\tau=4-5$ ч;
- глубина слоя X , см.

Коэффициент диффузии определяли по формуле:

$$D = \frac{C_{нов} - \frac{C_{нов} + C_{исх}}{2}}{C_{нов} - C_{исх}} \cdot \frac{X^2}{2\tau}$$

Значения полученных коэффициентов диффузии приведены в табл. 3.

Коэффициент диффузии углерода в аустените низкоуглеродистой стали в зависимости от направления насыщения и степени обжатия при прокатке

Обжатие при прокатке, %	Коэффициент диффузии $D \times 10^{-7}$, см ² /с	
	насыщение в направлении прокатки	насыщение перпендикулярно направлению прокатки
0	3,1	2,9
20	3,7	3,5
65	4,1	3,8

Судя по данным таблицы 3, холодная пластическая деформация при изученных условиях несколько ускоряет диффузионную подвижность углерода. Скорость перемещения углерода, хотя и незначительно, но отличается по отношению к направлению деформации. Насыщение поперек «полосок» перлитных колоний, ферритных зерен и дислокационных трубок более затруднено, чем вдоль этих структурных элементов.

Выводы

Экспериментально установлена анизотропия параметров науглероживания низкоуглеродистой стали, деформированной холодной прокаткой, что может быть использовано для активизации насыщения элементами при химико-термической обработке металлических изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.Алимов В.И., Баранов Д.Н. Создание и использование анизотропии коррозионной устойчивости в высокоуглеродистых сплавах. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2010. №4/1(46). С. 62 – 70.
- 2.Алимов В.И., Георгиаду М.В. Повышение износостойкости деталей горно-металлургического оборудования из хромоникелевых сталей. Уголь Украины. 2016. №9-10. С. 41 - 44.
- 3.Алимов В.И., Генкузина В.О., Георгиадис Т. Размерное химико-термическое восстановление деталей транспортного оборудования и инструмента повышенной точности. Сб. научных трудов Донбасского государственного технического университета. Алчевск, 2017. С. 125-130.

Alimov V. I., V. Genkuzina V.O. Anisotropy of diffusion in the solid-state carburization of deformed steel.

Researches carried out on the samples having different extent of sinking, and made of hot-rolled hire from low-carbonaceous steel. Studied a microstructure, microhardness and parameters of a crystal lattice at saturation by carbon of previously deformed steel. Depth of a nauglerozhenny layer depending on the direction of saturation and extent of sinking when

rolling, and also coefficient of diffusion of carbon in austenite of low-carbonaceous steel depending on the direction of saturation and extent of sinking when rolling is received. Anisotropy of parameters of a carburizing of the low-carbonaceous steel deformed by cold rolling that can be used for management of saturation of elements at chemical heat treatment of metal products is established. Set anisotropy parameters of carburizing low carbon steel deformed by cold rolling that can be used to enhance the saturation elements in the chemical-thermal treatment of metal products.

Keywords: *anisotropy of deformed steel, thermochemical treatment, diffusion flows, structure, carburizing, microhardness, the characteristics of fine crystalline structure*

Алимов В.И. – д-р техн. наук, профессор Донецкого национального технического университета, г. Донецк. Научные интересы: теория, технология и оборудование для термической обработки металлических изделий, коррозия и защита материалов, создание и защита объектов интеллектуальной собственности.

e-mail: alim41@mail.ru

Генкузина В.О.– инженер Донецкого национального технического университета, г. Донецк. Научные интересы: химико-термическая обработка металлических сплавов и изделий из них.

Статья поступила

20 июля 2017 г.

© Алимов В.И., Генкузина В.О., 2017

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 622.648

Пилавов М.В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Pilavov M.V.

MATHEMATICAL SIMULATION NONSTATIONARY MODES OF OPERATION BALL MILL FOR PREPARATION OF COAL-WATER FUEL

Приведены детерминированные математические модели описаний элементов на основе уравнения переноса массы, энергии и импульса. В соответствии с начальными и граничными условиями из этих уравнений подучены математические описания различных моделей процессов: модель идеального вытеснения, модель идеального перемешивания, диффузионная модель различных уровней сложности и ячеечная модель. Приведенные математические модели могут быть использованы при создании и анализе систем автоматического регулирования параметров работы шаровых мельниц.

Ключевые слова: детерминированная модель, идеальное вытеснение, перемешивания, диффузионная модель, ячеечная модель.

Введение

Ввиду сложности процессов приготовления водоугольного топлива [1], которые проявляются в большом количестве информации, содержащейся в таких системах, и во взаимном влиянии параметров системы друг на друга, математические модели таких процессов удобно составлять по отдельным участкам, что значительно облегчает их реализацию на ЭВМ. Такой подход называется статической декомпозицией системы, при котором сложная система разбивается на ряд простых устройств, для каждого из которых составляются уравнения, связывающие входные и выходные параметры. В каждом конкретном случае полную модель процесса получают, комбинируя варианты отдельных участков.

Целью работы является разработка детерминированных моделей,

описывающих характеристики работы шаровых мельниц приготовления водоугольного топлива.

Методика исследования

Основу детерминированных математических описаний элементов составляют уравнения переноса массы, энергии и импульса [2].

Формулируя соответствующие начальные и граничные условия, можно из этих уравнений вывести математические описания самых различных процессов.

В зависимости от вида функции распределения все многообразие математических моделей потоков может быть представлено в виде некоторых типовых моделей [3], описанных ниже.

Модель идеального вытеснения. В соответствии с этой моделью, описывающей в первом приближении процесс в получения ВУТ, принимается поршневое течение потоков без перемешивания вдоль шаровой мельницы при равномерном распределении вязкости в направлении, перпендикулярном движению. Время пребывания в системе всех частиц одинаково и равно отношению объема системы к объемному расходу смеси.

Математическое описание модели имеет вид

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = w \frac{\partial v}{\partial x},$$

где w - линейная скорость потока;

v - вязкость смеси;

τ - время;

x - координата.

Модель идеального перемешивания. Согласно этой модели, принимается равномерное распределение вязкости во всем потоке.

Зависимость между вязкостью ВУТ на входе и выходе имеет вид

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{V_t}{V} (v_{вх} - v_{вых}). \quad (1)$$

Функция отклика системы

$$v(\tau) d\tau = \frac{V_t}{V} \exp\left(-\frac{V_t}{V}\tau\right) = \exp\left(-\frac{\tau}{\bar{\tau}}\right) \frac{d\tau}{\bar{\tau}},$$

где $\bar{\tau}$ - среднее время пребывания смеси в системе.

Модели идеального перемешивания следуют процессы, происходящие в небольших помещениях в условиях интенсивного перемешивания.

Диффузионная модель. Различают однопараметрическую и двухпараметрическую диффузионную модель [4].

Однопараметрическая диффузионная модель. В данном случае основной является модель вытеснения, осложненная обратным перемешиванием, следующим формальному закону диффузии. Параметром, характеризующим модель, служит коэффициент турбулентной диффузии или коэффициент продольного перемешивания D_L . При составлении однопараметрической диффузионной модели принимаются следующие допущения:

- объемная скорость потока и коэффициент продольного перемешивания не изменяются по длине и сечению потока.

При таких допущениях модель описывается уравнением

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = W \frac{\partial v}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Уравнение (2) отличается от уравнения (1) введением дополнительного члена $D_L \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ учитывающего, турбулентную, диффузию или перемешивание. Величина D_L определяется опытным путем.

Двух параметрическая диффузионная модель. В этой модели учитывается перемешивание потока в продольном и радиальном направлениях, причем модель характеризуется коэффициентами продольного D_L и радиального D_Z перемешивания. При этом принимается, что величины D_L и D_Z не изменяются по длине и сечению вентилируемого или отапливаемого помещения, а скорость постоянна.

При условии движения потока с постоянной по длине и сечению скоростью уравнение двухпараметрической модели имеет вид

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = -W \frac{\partial v}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{D_Z}{Z} \frac{\partial}{\partial Z} \left(R \frac{\partial v}{\partial Z} \right). \quad (3)$$

При опытном определении коэффициентов продольного и радиального перемешивания D_L и D_Z их обычно представляют в виде безразмерных комплексов - критериев Пекле $Pe_L = \frac{wL}{D_L}$, где L - определяющий линейный размер вентилируемого помещения.

В этом случае уравнение диффузионной модели также приводится к безразмерному виду. С этой целью вводится безразмерная вязкость — $\frac{v}{v_0} = \bar{v}$; ; безразмерная длина $\frac{l}{L} = Z$ и время $\tau = \frac{L}{w} = \frac{V}{V_t}$, где V — объем помещения; V_t — производительность вентиляционной системы или системы воздушного отопления.

Учитывая, что производительность вентилятора принимается постоянной, уравнение (3) приводится к виду:

$$\frac{dv}{dz} = \frac{D_L}{wL} \frac{d^2v}{dz^2}. \quad (4)$$

Если $\frac{D_L}{wL} = 0 (Pe \rightarrow \infty)$, диффузионная модель переходит в модель идеального вытеснения; если $\frac{D_L}{wL} \rightarrow \infty (Pe_L = 0)$, диффузионная модель переходит в модель идеального смешения. По кривой переходного процесса можно определить связь между дисперсией σ^2 и безразмерным параметром $\frac{D_L}{wL}$. Для малых отклонений от потока идеального вытеснения C -кривые хорошо аппроксимируются нормальным гауссовским распределением, и связь между дисперсией σ^2 и $\frac{D_L}{wL}$ дается в виде уравнения:

$$\sigma^2 = 2 \frac{D_L}{wL}. \quad (5)$$

Зависимость коэффициента продольного перемешивания D_L различных факторов (размера помещения, скорости потока, физических свойств среды и т. д.) устанавливается опытным путем не только с помощью анализа выходных кривых, но и при постановке опытов с использованием теории подобия.

Ниже приведены значения коэффициента продольного перемешивания, полученные для различных случаев.

Для однофазного потока в ламинарной области

$$\frac{D_L}{wL} = \frac{1}{192} Re Sh. \quad (6)$$

В этом выражении:

$Sh = \frac{v}{D_m}$ - критерий Шмидта;

$Re = \frac{wL}{\nu}$ - критерий Рейнольдса;

D_L - коэффициент молекулярной диффузии.

В турбулентной области молекулярной диффузией пренебрегают [5].

$$\frac{D_L}{wL} = 3.57 \sqrt{\lambda_{\text{экв}}},$$

где $\lambda_{\text{экв}}$ - коэффициент трения (для течения в трубопроводе) или параметр, характеризующий конфигурацию стенок, вдоль которых распространяется поток.

Для переходной области предложено эмпирическое уравнение

$$\frac{D_L}{wL} = 1.2 \cdot 10^7 \lambda^{3.6} \left(\frac{d}{2L} \right)^{-0.141}.$$

Ячеечная модель. Основой модели является представление об идеальном перемешивании в пределах слоев, расположенных последовательно, и отсутствии перемешивания между ними. Параметром, характеризующим модель, служит число ячеек m .

Математическое описание ячейечной модели включает m линейных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{1}{m} \frac{dv}{d\tau} = \tau_n (v_{i-1} - v_i),$$

где $i = 1, 2, \dots, m$.

Связь между распределением по C - кривой и числом ячеек m определяется из соотношения

$$\bar{v} = \frac{v}{v_0} = \frac{m\theta^{m-1}}{(m-1)!} \exp(-m\theta),$$

где $\theta = \frac{\tau}{V/V_i}$.

Соотношение между числом ячеек и дисперсией σ^2 дается в виде

$$\sigma^2 = \frac{1}{m} = 2 \frac{D_L}{wL} - 2 \left(\frac{D_L}{wL} \right)^2 \left(1 - \exp \left(- \frac{wL}{D_L} \right) \right)$$

или с достаточной для практических расчетов точностью при $m > 10$

$$\sigma^2 = \frac{1}{m} = 2 \frac{D_L}{wL}.$$

При $m = 1$ ячеечная модель переходит в модель идеального смешения, а при $m \rightarrow \infty$ - в модель идеального вытеснения. Ячеечная модель соответствует последовательно соединенные объемам с интенсивным перемешиванием или наличие различных зон в барабане шаровой мельницы.

Комбинированные модели. Не все реальные процессы удастся описать с помощью рассмотренных выше моделей, в частности включающих байпасные и циркуляционные потоки, а также процессы при наличии застойных зон. В таких случаях используются комбинированные модели.

При построении комбинированной модели принимают, что шаровая мельница состоит из отдельных зон, соединенных последовательно или параллельно, в которых наблюдаются различные структуры потоков: зона поршневого потока (идеального вытеснения), зона потока с идеальным перемешиванием; зона с продольным перемешиванием; зона застойная.

Помимо этого, могут наблюдаться следующие локальные потоки: байпасный, циркуляционный, проскальзывание и т. д.

Наличие указанных видов потоков устанавливается по опытным кривым зависимости выходной величины от входной. Следует иметь в виду, что увеличением количества зон можно описать процесс любой сложности, но математическое моделирование одновременно усложняется.

Выводы

Приведенные математические модели могут быть использованы при создании и анализе систем автоматического регулирования параметров работы шаровых мельниц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов Е.В. Водоугольное топливо – технология будущего. Энергетика и промышленность России. 2007. №5(81). С. 10-16.
2. Андрийчук Н.Д., Коваленко А.А., Соколов В.И. Аэрогидромеханика. Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2000. 516 с.
3. Андрийчук Н.Д., Коваленко А.А., Пилавов М.В. Математические модели

процессов приготовления ВУТ в шаровых мельницах. Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля. 2015. 54 с.

4. Недопекин Ф.В., Коваленко А.А., Соколов В.И. Диффузионные процессы в стационарных газовых потоках. Луганск: Изд-во ВЛУ им. В. Даля. 2007. – 224 с.

5. Handbook of Fluids in Motion. Edited by Nicholas P. Cheremisinof, Ramesh Gupta., Ann. Arbor Science Publishers. 1983.

Pilavov M.V. Mathematical Simulation Nonstationary Modes of Operation Ball Mill for Preparation of Coal-Water Fuel.

Deterministic mathematical model of the item descriptions based on transport equations of mass, energy and momentum is produced. In accordance with the initial and boundary conditions of these equations obtained mathematical descriptions of different process models: model perfect displacement, perfect mixing model, diffusion model with different levels of complexity and the cell model. The mathematical models can be used in the design and analysis of automatic control systems of working parameters of ball mills.

Keywords: *deterministic model of ideal displacement, mixing, diffusion, cell.*

Пилавов М.В. канд.техн.наук, доцент Луганского национального университета им. В. Даля, г. Луганск. Научные интересы: математическое моделирование процессов тепломассообмена в котельных установках, регулирование параметров котельных установок.

e-mail: manolis.pilavov@mail.ru

Pilavov M.V., Ph.D, Associate Professor Vladimir Dalh Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: mathematical simulation of heat and mass transfer processes in boiler installations , control boiler plants parameters.

e-mail: manolis.pilavov@mail.ru

*Статья поступила
14 августа 2017 г.
© Пилавов М.В. 2017*

Засько В.В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОБАВОК ИЗ ОТХОДОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ КАК КОМПОНЕНТА КОМПОЗИЦИОННЫХ БЕТОНОВ

Zasko V.V.

THE USE OF WASTE METALWORKING GRINDING COMPANIES IN THE REGION AS A COMPONENT OF COMPOSITE CONCRETES

Широкие возможности использования дисперсных отходов металлообработки шлифованием на предприятиях региона в составе строительных композиций позволяет создавать мелкозернистые бетоны с высокой прочностью. Высокая удельная поверхность абразивосодержащих отходов обеспечивает их реакционную способность и структурообразующую значимость в составе цементного вяжущего.

Ключевые слова: дисперсное наполнение, бетонные композиты, отходы металлообработки, прочность, плотность, пористость, водопоглощение

Введение

Важной задачей строительной отрасли было и остается производство эффективных строительных и отделочных материалов при минимизации расхода вяжущего. Это достигается при научно обоснованном подходе к проблеме применения производственных отходов в технологии производства строительных материалов. На сегодняшний момент остается невостребованным и находится на промышленных свалках и в шламонакопителях большое количество ценнейшего сырья. Определение возможного пути их подготовки, при необходимости, переработки, исследования механизмов действия химически активных шламов и инертных наполнителей на их основе, процессы гидратации и твердения модифицированных цементных и композиционных материалов является перспективной тенденцией развития строительной отрасли. Использование шламовых отходов позволяет получать высокие экономические эффекты за счет экономии вяжущего при повышении качества строительных мелкозернистых бетонов, что способствует значительному улучшению экологической обстановки вблизи предприятий промышленности региона.

В республике накоплено достаточное количество вторичных ресурсов в виде различных отходов промышленности и минеральных шламов, которые необходимо использовать для рационального расхода цементных и композиционных вяжущих, получать высококачественные мелкозернистые бетоны [1-3]. Традиционно в качестве наполнителей и модификаторов строительных композиций используют побочные продукты тепловых электростанций, металлургических производств, выпускающих чугун, сталь, ферросплавы, шламовые отходы гипсовых, известково-гипсовых, гипсокарбонатных составов, содержащие комплекс неорганических солей и органические примеси, обладающие стабильным химическим составом и физическими свойствами.

Шлифовальные отходы металлообработки представляют наибольший интерес как армирующие и уплотняющие наполнители мелкозернистых бетонов. Большая удельная поверхность отходов может быть использована для уменьшения недостатков мелкозернистого бетона за счет усиления адгезионного взаимодействия цементного теста с поверхностью частиц. Введенные в состав мелкозернистых бетонов микрочастицы выполняют роль не только армирующего наполнителя, но и активного компонента системы, оказывающего существенное влияние на формирование активных центров кристаллизации. Возможность использования этого естественного резерва улучшения свойств мелкозернистых бетонов представляется весьма актуальной и экономически оправданной.

Целью работы является получение мелкозернистого бетона с повышенными эксплуатационными свойствами путем модификации бетонной смеси добавками из отходов металлообработки при вибропрессовании со сдвигом.

Методика исследований

Разработана технологическая схема изготовления образцов из бетонной смеси с использованием добавок, полученных из шлифовальных отходов. Она включает операции подготовки исходных материалов, заполнение формы исследуемой смесью и ее предварительное уплотнение; добавление бетонной смеси в форму и выравнивание ее поверхности; вибрации под давлением [6]. Вибропрессование осуществляли со сдвигом, что позволило увеличить сдвигающие деформации и обеспечило улучшение физико-механические свойств бетона. Далее исследовали физико-механические свойства полученного строительного материала.

Результаты исследований

Получение высокоэффективных вяжущих веществ сопровождается использованием сложных составов компонентов, которые обеспечивают полу-

чение высококачественных бетонов разного функционального назначения с улучшенными, а иногда и с принципиально новыми свойствами и определенной заранее заданной структурой. В основу создания таких вяжущих положен принцип целенаправленного управления технологией на всех ее этапах: использование активных компонентов, разработка оптимальных составов, применение химических модификаторов, использование механохимической активации компонентов и некоторых других приемов [4, 5]. Поэтому введение в состав мелкозернистых бетонов добавок из шлифовальных отходов металлообработки целенаправленно оказывает влияние на процессы структурообразования мелкозернистого бетона с максимальным проявлением сил физико-химического взаимодействия цементирующей связки с поверхностью микрочастиц, что позволяет получать изделия с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

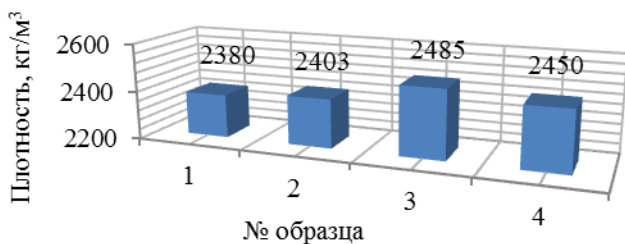
Высказанные теоретические положения подтверждаются экспериментально [8, 9]. Для количественного определения взаимодействия цементного теста с добавками шлифовальных отходов, содержащих абразивные шламы, выполнена сравнительная оценка свойств мелкозернистых бетонов с добавкой (составы 2–4) и без нее (состав 1), представленная на рисунках 1–2.

Как видно из представленных диаграмм, введение уплотняющих добавок оказывает положительную динамику в улучшении физико-механических свойств: плотности, пористости, водопоглощении, прочности на сжатие и растяжение при изгибе (рис. 1 а, б, в). Наилучшие показатели были получены при введении уплотняющей добавки в количестве 10 % от массы вяжущего (цемента).

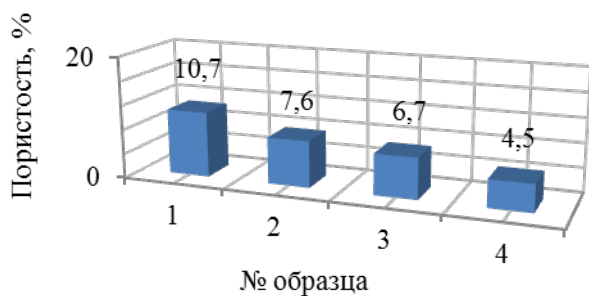
Проведенные исследования и их анализ показали, что увеличение добавки микрочастиц шлифовальных отходов приводит к снижению пористости на 29 %, изменению структуры бетона за счет уменьшения объема пор на 32,5 % и увеличению плотности на 4,2 % по сравнению с бездобавочными бетонами аналогичного состава [7].

Эффект улучшения свойств модифицированного добавками бетона происходит за счет уплотнения цементного камня металлическими микрочастицами и частицами карбида кремния, который способствует получению дисперсно-уплотненного бетона с плотной структурой, повышенными прочностными характеристиками по сравнению с обычным бетоном аналогичного состава [8].

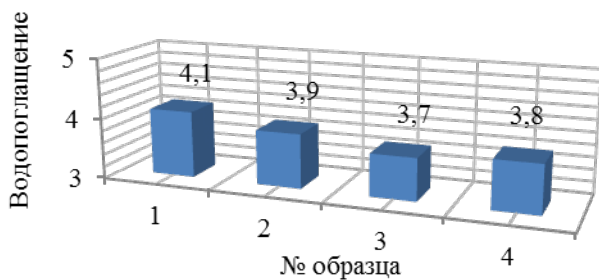
Исследование механических свойств полученного мелкозернистого бетона [8, 9] показало тенденцию увеличения прочностных характеристик (рис. 2 а, б). Так прочность на сжатие увеличилась на 36 %, прочность на растяжение при изгибе на 35,9 %.



а



б



в

Рис. 1. Изменение физических свойств бетона, модифицированного добавками в сравнении с бездобавочным образцом: а – плотности; б – пористости; в – водопоглощения; 1 - состав без добавки; 2-4 – составы с добавкой соответственно 4,5; 10; 15 %

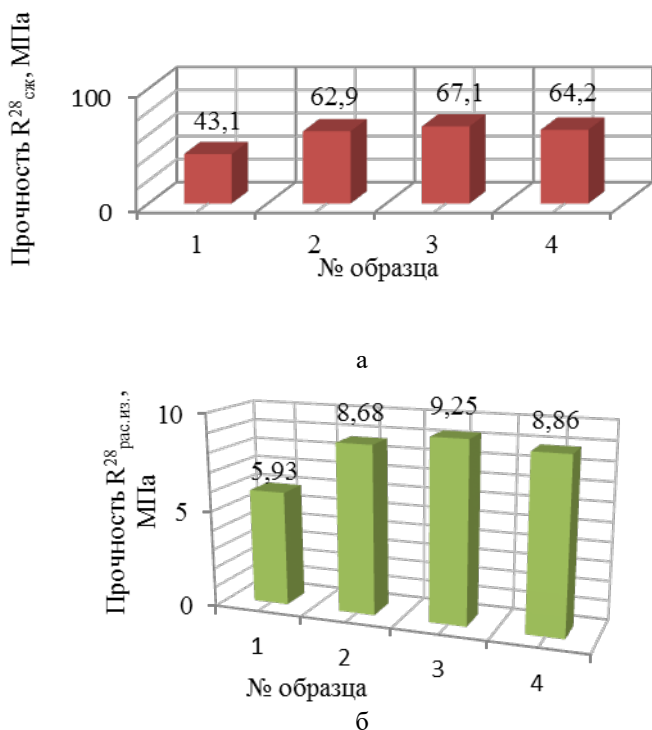


Рис. 2. Изменение прочностных свойств бетона модифицированного добавками в сравнении с бездобавочным образцом: а – прочность на сжатие; б – прочность на растяжение при изгибе; 1 – состав без добавки; 2-4 – составы с добавкой соответственно 4,5; 10; 15 %

Проведенные исследования показали, что добавление микрочастиц шлифовальных отходов способствует наибольшему повышению прочности на растяжение при изгибе, при этом показатели трещиностойкости и вязкости разрушения материала максимальны и превышают аналогичные показатели бездобавочного бетона соответственно на 20 % и 17 % [9].

Испытания на истираемость показали, что введение в состав бетона уплотняющих добавок шлифовальных отходов способствует повышению устойчивости к истиранию на 25 % по сравнению с бетоном без добавок, что подтверждает способность микрочастиц добавки контролировать перемещение воды в бетонной смеси и уменьшать возможность сегрегации мелких частиц цемента и песка, и обеспечить более эффективную гидрата-

цию цемента, которая в сочетании с лучшим сцеплением цементного раствора дает более прочную и долговечную поверхность.

При испытании на морозостойкость установлено повышение показателя на одну ступень, вследствие того что микрочастицы добавки повышая устойчивость бетона к пластическому растрескиванию, уменьшает количество водных каналов в бетоне, и в результате снижения проницаемости придает большую устойчивость к промерзанию.

Выводы

Таким образом, проведенные испытания вибропрессованного пунсо-нами с наклонной рабочей поверхностью бетона с добавками из отходов металлообработки подтвердили теоретические предположения о возможности получения мелкозернистого бетона с улучшенными реологическими и эксплуатационными свойствами, что расширяет область применения данного материала для строительных конструкций, работающих в особых условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туркина И. А. Необходимость и опыт использования отходов производства: сб. докладов V Международного конгресса по управлению отходами и природоохранным технологиям ВэйстТэк-2007. М., 2007.

2. Бальзаников М. И., Петров В. П. Экологические аспекты производства строительных материалов из отходов промышленности // Восьмые академические чтения РААСН «Современное состояние и перспективы развития строительного материаловедения». Самара, 2004. С. 47-50.

3. Каушанский В. Е., Баженова О. Ю. Энерго- и ресурсосбережения в технологии портландцемента за счет использования техногенных и нетрадиционных материалов // Седьмые академические чтения РААСН «Современные проблемы строительного материаловедения». Белгород, 2001. С. 201-204.

4. Ольгинский А. Г., Бершадекий Ф. Г. Значение микрозаполнителя в формировании структуры и свойств бетона // Управляемая структура образования в производстве строительных материалов. Киев: Будивельник, 1998. С. 76-80.

5. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов на/Д: Феникс, 2007. 368 с.

6. В.В. Засько Технология производства вибропрессованных бетонных изделий // V Международный научно-практический форум «Технологии и процессы в горном деле и строительстве» 5-7 апреля 2017 г., ДонНТУ г. Донецк. Сб. науч. трудов. – Донецк, Изд-во ДонНТУ, 2017. С. 106-110

7. Рябичева Л.А., Засько В.В. Исследование пористости бетона с использованием металлоабразивных отходов. //Сб. науч. трудов. Ресурсосбере-

гающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. - Луганск, Изд-во ЛНУ им. В. Даля. 2017. № 2 (18). С.105-112.

8. Засько В.В., Рябичева Л.А. Прочность вибропрессованного бетона, дисперсно-армированного добавками из шлифовальных отходов обработки автомобильных клапанов. //Сборник тезисов докладов по материалам конференции «Научно-технические достижения студентов архитектурно-строительной отрасли» 21.04.2017 г., ДонНАСА, г. Макеевка, 2017. С. 177-178

9. Засько В.В. Исследование прочности на растяжение при изгибе вибропрессованного бетона с металлоабразивными отходами. //Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. Сб. науч. трудов. – Луганск, Изд-во ЛНУ им. В. Даля. № 3 (5) часть 2. 2017. С.117-122

Zasko V.V. The use of waste metalworking grinding companies in the region as a component of composite concretes/

The possibility of using dispersed waste metals grinding at the enterprises of the region as part of the construction of the compositions allows you to create fine-grained concretes with high strength. High specific surface abrasive containing waste ensures their reactivity and structural importance in the composition of the cement binder.

Keywords: *disperse filling, concrete composites, scrap, strength, density, porosity, water absorption*

Засько Виталий Васильевич – старший преподаватель. Луганский национальный университет имени Владимира Даля, институт архитектуры, строительства и ЖКХ

e-mail: vizasko@yandex.ru.

Zacko Vitali - senator teacher Institute of architecture, construction and housing and communal services, Vladimir Dalh Lugansk National University.

e-mail: vizasko@yandex.ru.

*Статья поступила
6 сентября 2017 г.
© Засько В.В., 2017*

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 1 марта, до 1 июня, до 1 сентября, до 1 декабря.

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 национальный 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 абзацного отступа. (выравнивание по левому краю). Шрифт Times New Roman, размер 11 пт, стиль обычный.

Фамилии, инициалы авторов на языке текста статьи (русском, украинском или английском) размещаются через интервал после УДК (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полужирный**, 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 - **полужирный**, 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 - **полужирный**, выравнивание - по левому краю).

Название статьи на английском языке набирается прописными буквами через интервал без переносов (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полужирный**, 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 через интервал 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 помещаются с новой строки через интервал после предыдущего параграфа, абзацный отступ - 0,75 см, шрифт Times New Roman, размер - 10 пт, стиль - **полужирный**.

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. **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** размещается в конце статьи через интервал после текста перед аннотациями и набирается прописными буквами (шрифт Times New Roman, размер - 10 пт, стиль - **полужирный**, 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 согласно **ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка»**.

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 (шрифт Times New Roman, размер - 9 пт, стиль - курсив, выравнивание - по ширине).

Ключевые слова на английском языке (до 7 слов) размещаются через интервал после аннотации (шрифт Times New Roman, размер - 9 пт, стиль - курсив, выравнивание - по ширине).

8. **Сведения об авторах** приводятся через интервал от аннотаций: фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звание, должность, место работы, научные интересы, адрес электронной почты (шрифт Times New Roman; размер - 9 пт; стиль - обычный).

Сведения об авторах также приводятся полностью *на английском языке*.

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 в формате .doc** ("Файл" - "Сохранить как" - "Документ Word 97-2003").

Страницы не нумеровать.

Формулы и символы набираются в редакторе формул **Microsoft Equation 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.

Актуальная версия требований к оформлению статей находится на сайте сборника: <http://resourcesaving.wix.com/sbornik>

Научное издание

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

Сборник научных трудов
№3 (20) 2017

Ответственный за выпуск *Л.А. Рябичева*
Литературный редактор *Л.А. Рябичева*
Оригинал-макет *Е.А. Гриниченко*

Подписано к печати 11.11.2017
Формат 60 x 84 /16. Бумага офс. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Услов.печ. листов. 6,04. Обл.-изд. л. 6,5.
Тираж 100 экз. Изд. № 0059. Цена договорная.

**Издательство
Луганского национального университета
имени Владимира Даля**

Свидетельство о регистрации серия МИ-СГР ИД 000003 от 20.11.2015 г.

Адрес издательства: 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20а
Телефон: (0642) 34-48-28. Факс: (0642) 34-48-48
e-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com
<http://dahluniver.ru/>
<http://resourcesaving.wix.com/sbornik>