

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ**

**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ,  
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

**Материалы Международной научно-технической  
конференции**

***29-30 октября***

**Брест 2014**

УДК 681.5; 539.3; 658.51; 621

H72

*Рецензенты:*

профессор кафедры теоретической и прикладной механики БГУ, д.т.н.,  
профессор **Богданович А.В.**  
заведующий кафедрой технологии машиностроения ГГТУ  
им. П.О.Сухого, к.т.н., доцент **Кульгейко М.П.**

*Редакционная коллегия:*

**Драган А.В.** – декан машиностроительного факультета БрГТУ, к. т. н.;  
**Прокопеня О.Н.** – заведующий кафедрой АТПиП БрГТУ, к.т.н.;  
**Хвисевич В.М.** – заведующий кафедрой СМиТМ БрГТУ, к.т.н.;  
**Горбунов В.П.** – заведующий кафедрой машиноведения БрГТУ, к.т.н.;  
**Медведев О.А.** – заведующий кафедрой технологии машиностроения БрГТУ, к.т.н.;  
**Монтик С.В.** – заведующий кафедрой технической эксплуатации автомобилей  
БрГТУ, доцент, к.т.н.

Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы.

**H72** Междунар. науч.-техн. конф., Брест, 29-30 октября 2014 г. Брест: БрГТУ,  
2014. – 240 с.

**ISBN 978-985-493-312-2**

В материалах конференции в обобщенном виде приведены результаты исследований в области автоматизации производственных процессов, современных технологий обработки материалов, конструирования, производства, диагностики и эксплуатации машин и станочного оборудования. Значительная часть материалов посвящена методам и результатам исследований физических процессов в материалах при их обработке.

Сборник предназначен для специалистов, работающих в сфере машиностроения, автосервиса, управления технологическими процессами и автоматизации. Он также представляет интерес для научных сотрудников, аспирантов, магистрантов и студентов соответствующих специальностей.

УДК 681.5; 539.3; 658.51; 621

ISBN 978-985-493-312-2

© Издательство БрГТУ, 2014

**БИБЛИОТЕКА**  
Брестского государственного  
технического университета

## **УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТОТЕХНИКА**

**THE PROBLEM OF MOBILE ROBOTS MOVEMENT CONTROL***Stetter R.<sup>1</sup>, Prokopenya O.<sup>2</sup>, Kozlovich K.<sup>2</sup>*

1) High Technical School of Ravensburg-Weingarten, Germany

2) Brest state technical university,  
Brest, Belarus

The task of steering the movement of mobile vehicles has two components: planning desired motion trajectory and following the trajectory with the required accuracy by controlling the actuators.

Trajectory planning can be carried out without regard to design of a robot. It is important that robot is in principle able to work with desired trajectory from kinematics point of view. In this sense, robots, wheels of which can be deployed at any angle independently from one another, have no restrictions on shape of trajectory.

From dynamics point of view not every trajectory can be followed by a specific robot, as there are restrictions on amount of acceleration and minimum radius of curvature of trajectory due to finite value of traction coefficient and possibility of tipping. These limitations must be taken into account when calculating trajectory, ie in practice, the task of trajectory planning must be addressed to a particular robot, taking into account its characteristics and design features.

Even if these restrictions are satisfied, actual trajectory will always be different from preassigned due to inertia of wheel's drives. Error of trajectory following is determined by dynamic properties of drive and will obviously increase with speed increasing.

Thus, the solution of the problem involves development of an efficient algorithm for calculating desired trajectory based on the design parameters of mobile platform and synthesis of drive control system of robot with required dynamic characteristics. In general, the system should provide steering of wheels turn angles, and the speed of their rotation, ie speed of movement of the robot.

On first step of problem solution an adaptive algorithm for calculating trajectory that directs robot in a predetermined point at a predetermined angle has been developed. The algorithm showed acceptable accuracy for practical use (angle deviation does not exceed 1 ... 2 degrees, and position deviation 50 ... 100 mm) in simulation. Figure 1 shows effect of coefficient  $K_2$  on form of trajectories. By means of this coefficient desired trajectory can be achieved in order to bypass obstacles and meet certain conditions and restrictions.

This algorithm was used to develop control system of mobile robot with four motor units. Each module has two wheels independently driven by DC motors. This robot was designed and manufactured at High Technical School of Ravensburg-Weingarten (Germany), in cooperation with which this work was carried out.

Figure 2 shows arrangement of modules and direction of velocity vectors of platform motion in a circle. Required rotation angles of modules and wheel velocities can be easily expressed through radius of circle using kinematic relations. In fact, this allows us to calculate desired trajectory of motion of each module at a known path of movement of the platform. Thus, accuracy of motion of platform is determined by how well given trajectory is fulfilled by each module. This allows to initially treat

each module as a separate motor subsystem such that output variables are angle and speed of motion, and input – motor currents, and apply known control theory calculation methods.

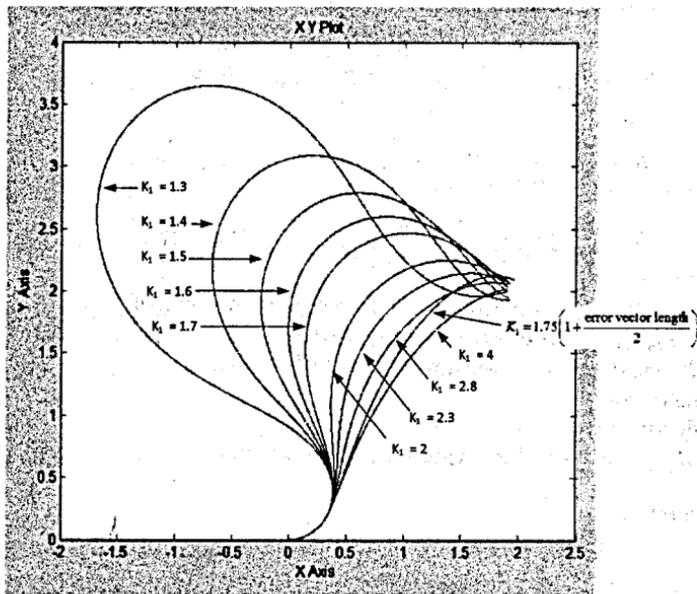


Figure 1 – Simulation of trajectory planning process

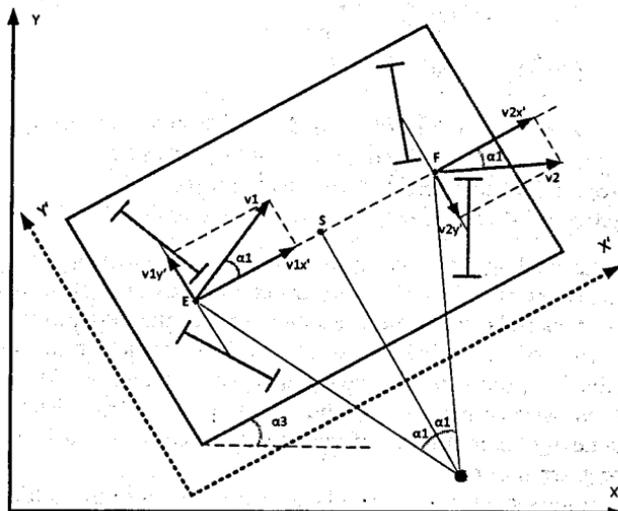


Figure 2 – Simplified kinematics of the robot

On second stage there was dynamic model of motor unit developed in a form of equations of state space model implemented later in SIMULINK application of MATLAB programming environment:

$$\dot{\omega} = -b_{11}I_{armature1} + b_{12}I_{armature2} + b_{13}L_{friction1} - b_{14}L_{friction2}, \quad (1)$$

$$\dot{v} = b_{21}I_{armature1} + b_{22}I_{armature2} - b_{23}L_{friction1} - b_{24}L_{friction2}, \quad (2)$$

$$\dot{\phi} = \omega, \quad (3)$$

$$b_{11} = b_{12} = \frac{0.5adC_M U}{0.5Jd^2 + J_{drive}a^2U^2}, \quad b_{13} = b_{14} = \frac{b_{11}}{C_M U},$$

$$b_{21} = b_{22} = \frac{0.25C_M U}{0.125d^2m + J_{drive}U^2}, \quad b_{23} = b_{24} = \frac{b_{21}}{C_M U},$$

where  $I_{armature1}$ ,  $I_{armature2}$  – electric current in armature winding of the motor 1, motor 2;

$L_{friction1}$ ,  $L_{friction2}$  – torque of resistance of wheels;

$a$  and  $d$  – the distance between wheels and wheel diameter;

$C_M$  – motor constant;

$U$  – reduction drive ratio;

$m$  and  $J_{drive}$  – mass and moment of inertia of module.

Control mode:

$$I_{armature1} = I_{armature} - \Delta I_{armature}, \quad (4)$$

$$I_{armature2} = I_{armature} + \Delta I_{armature}, \quad (5)$$

$$I_{armature} = K_1(v_{preset} - v), \quad (6)$$

$$\Delta I_{armature} = K_2(\tau_d \cdot \dot{\varepsilon} + \varepsilon), \quad (7)$$

$$\varepsilon = (\phi_{preset} - \phi), \quad (8)$$

where  $\phi_{preset}$  – preset angle of turning of module at the end of trajectory;

$v_{preset}$  – preset linear velocity of module at the end of trajectory;

$K_1$  – proportional coefficient of velocity control circuit;

$K_2$  – proportional coefficient of angle control circuit.

Motion of the module was investigated using this mathematical model when following various types of trajectories with different types of control loops of rotation angle and speed controls. It has been established that the best quality of transient's processes is achieved using PD controller in module angle control loop. A proportional controller in speed control loop ensures good enough quality. Under types of controllers above with corresponding adjustment deviation from desired trajectory of the module is negligible in process of moving at a speed of up to 1 m / s. This speed is nominal for given design.

Simulation results suggest that calculated values of controller settings ensure normal operation of robot control system as a whole. The results obtained are expected to be tested experimentally on workable sample of robot.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИРУЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УЧАСТКОВ И ЛИНИЙ

*Здор Г.Н., Новичихина Е.Р.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

*Проблема.* Каждая производственная система (участок, линия, цех), особенно автоматизированная и роботизированная, является сложным и уникальным объектом. Для анализа таких систем требуется одновременно несколько моделей. Вид и состав моделей меняются в зависимости от объекта, задач и этапа анализа. Приходится каждый раз заново переделывать программное обеспечение для интеграции моделей и организации их взаимодействия.

*Цель проекта.* Экономия времени, средств и квалифицированного труда при разработке программного обеспечения для моделирования производственных систем.

*Ожидаемый конечный результат проекта.* Универсальная программная среда, которая без дополнительного программирования (без написания кода):

- а) настраивается на объект;
- б) интегрирует требуемые модели произвольного состава и функций;
- в) автоматически управляет согласованными запусками моделей и обменом данными между ними;
- г) определяет, что взаимное уточнение моделей завершено, останавливает итерации моделирования и обобщает результаты.

*Область использования результатов проекта.* Проектирование производственных систем в машиностроении и приборостроении.

*Основная идея.* В нашем моделирующем программном обеспечении стоит задача совмещения универсальности и автоматизма. В известных программных продуктах для моделирования производственных систем эта задача пока не находит удовлетворительного решения, так как эти два свойства противоречивы. Мы обратили внимание, что схожая задача успешно решается в другой предметной области – в программных средах для разработки экспертных систем (ЭС). Предлагается применить принципы построения и функционирования экспертных систем к моделирующему программному обеспечению.

*Суть предлагаемого подхода.*

Мы ориентировались на ЭС продукционного типа с представлением знаний в виде правил. Структура правила:

условия (антецеденты)  $\Rightarrow$  действия (консеквенты).

Считаем, что знания о системе заключены в моделях. Каждую модель будем рассматривать как одно «большое» правило. Совокупность моделей даст ЭС, заполненную знаниями о системе. Каждая модель предназначена для решения своих специфических задач. Вместе с тем, интерфейс всех моделей должен быть выполнен по единому шаблону. Кроме того, все модели должны отражать

одинаковый набор состояний основного технологического оборудования производственной системы. В этом случае модели могут использоваться как сменные модули.

Аналогом механизма логического вывода экспертной системы в нашем программном обеспечении будет выступать единый и неизменный алгоритм итерационного запуска моделей и обмена уточняющей информацией.

После очередного запуска все модели обмениваются между собой вновь полученными фактами. Эти новые факты уточняют исходные данные моделей. Модели запускаются вновь. Так продолжается до тех пор, пока не будет получено значение целевого факта. В качестве такового используется сходимость результатов у всех моделей по одной из ключевых характеристик системы, отражающей ее целевое назначение. Эта характеристика должна интегрально учитывать все аспекты производственной системы и влиять на все ее результаты функционирования. Нами показано, что ключевой характеристикой может служить средний коэффициент использования основного технологического оборудования по времени работы. Сходимость значений ключевой характеристики с заданной точностью у всех моделей будет означать, что взаимное уточнение моделей завершено.

При таком подходе программное обеспечение будет единообразно и автоматически функционировать вне зависимости от вида и состава использующихся моделей. Мы избавляемся от пользовательского программирования при настройке на объект и требуемые модели.

*Программная реализация.* Описанный подход был реализован в программной среде «ESMod» (<http://www.bntu.by/fitr-rs.html> опция «Проект ESMoD/Демо»). Тестирование показало принципиальную работоспособность идеи и ожидаемую эффективность реализации.

УДК 681.5.09

## **ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ТРАНЗАКЦИЙ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ**

*Гулай А.В., Зайцев В.М.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Информационная совместимость составных частей мехатронной системы достигается за счет применения унифицированных телеметрических и телематических транзакций. Для нормального функционирования мехатронного оборудования системы необходимо обеспечивать определенную достоверность передачи транзакций. Достоверность оценивается вероятностью  $P_{\text{дост}}$  того, что в транзакции не содержатся искаженные биты, обусловленные процессами передачи информации по каналу.

Фактический объем транзакций  $n_{\text{факт}}$  теснейшим образом связан с обеспечением требуемой достоверности их передачи. Он существенно влияет на временные соотношения всех процессов информационного обмена в мехатронной системе, поскольку основная составляющая времени передачи транзакции  $T$  определяется отношением  $T = n_{\text{факт}}/V$ , где  $V$  – номинальная скорость передачи бит по каналу.

Для достижения требуемой достоверности передачи транзакций по каналам применяется помехоустойчивое кодирование. Очевидно, что в общем случае необходим рациональный выбор триплетов  $(n, k, d)$  помехоустойчивого кода  $G$ , минимизирующих параметр  $n_{\text{факт}}$ . При условии обеспечения требуемой достоверности  $P_{\text{дост}}$ .

Предложена технология рационального выбора триплетов, которая основывается на введении вспомогательных функций:

- базовой функции  $W(P_{\text{ош}}, n_i, s)$  вероятностей образования ошибок кратности не ниже  $s$  в каждом кодовом блоке объемом  $n_i$  бит при его передаче по каналу со скоростью возникновения битовых ошибок  $P_{\text{ош}}$ ;

- функции  $L(P_{\text{дост}}, n_{\text{инф}}, n_i, r_i, t_i)$  предельно допустимых вероятностей наличия остаточных ошибок  $k$  в каждом кодовом блоке при условии достижения требуемой достоверности передачи транзакции  $P_{\text{дост}}$  за счет выявления и исправления кодом  $G$  битовых ошибок кратности  $t_i$ .

Применение введенных функций позволяет для блочного помехоустойчивого кода  $G$  произвести обоснованный отбор допустимых решений путем проверки выполнения основного критериального условия  $W(P_{\text{ош}}, n_i, s) \leq L(P_{\text{дост}}, n_{\text{инф}}, n_i, r_i, t_i)$ .

Условие отражает статистическую возможность компенсации негативных явлений, которые обусловлены появлением в кодовых блоках кратных битовых ошибок, за счет применения определенных триплетов  $(n, k, d)$  помехоустойчивого кода. Оно обеспечивает рациональное выделение групп триплетов, допустимых для создания кодовых блоков передачи транзакций с необходимой достоверностью на каналах заданного качества.

В системах блочного кодирования для каналов с независимыми ошибками лучшим конструктивизмом в смысле соотношений  $k, r(d)$  триплетов обладают БЧХ коды. Для БЧХ кодов с  $d = 7$  (кратность битовых ошибок  $t \leq 3$ ) значение параметра  $s \geq 4$ , а базовая функция вероятностей образования ошибок кратности не ниже 4 в каждом кодовом блоке объемом  $n_i$  бит принимает следующую форму:

$$\begin{aligned}
 W(P_{\text{ош}}, n_i, s = 4) = & 1 - (1 - P_{\text{ош}})^{n_i} - n_i P_{\text{ош}} (1 - P_{\text{ош}})^{n_i - 1} - \\
 & - n_i \frac{n_i - 1}{2} P_{\text{ош}}^2 (1 - P_{\text{ош}})^{n_i - 2} - \\
 & - n_i \frac{(n_i - 1)(n_i - 2)}{6} P_{\text{ош}}^3 (1 - P_{\text{ош}})^{n_i - 3}.
 \end{aligned}$$

Рациональный поиск триплетов помехоустойчивого кода заключается в следующем. Построены графики базовых функций  $W(P_{\text{ош}}, n_i, s = 4)$  для практически значимых дискретных значений скоростей ошибок и дискретных параметров  $n_i$  и вычислены значения функции предельно допустимых вероятностей на-

личия остаточных ошибок в каждом кодовом блоке  $L(P_{\text{дост}} = 0,999, n_{\text{инф}} = 1056, n_i, r_i, t_i \leq 3)$ . Результатом проверки выполнения основного критериального условия для  $s \geq 4$  (вариант выявления и исправления ошибок кратности не ниже 3) являются следующие возможные решения (таблица 1):

- при необходимости организации работы мехатронной системы на каналах с  $P_{\text{ош}} = 5 \cdot 10^{-2}$  ни один из представленных триплетов БЧХ кода с  $t_i \leq 3$  ( $d_i = 7$ ) не обеспечивает передачу транзакций с требуемой достоверностью и необходимо либо применение каналов более высокого качества, либо иного кода G;

- при необходимости организации работы мехатронной системы на каналах с  $P_{\text{ош}} = 10^{-2}$  могут быть применены БЧХ коды с  $t_i \leq 3$  ( $d_i = 7$ ) в виде двух триплетов: (23, 12, 7) и (31, 16, 7). Они обеспечивают передачу транзакций с требуемой достоверностью, при этом код Голя, как частный случай БЧХ кода, которому соответствует триплет (23, 12, 7), более предпочтителен. Он дает наименьший фактический объем транзакции на уровне 2048 бит;

- для организации работы мехатронной системы на каналах при  $5 \cdot 10^{-3} \leq P_{\text{ош}} \leq 10^{-2}$  могут быть применены БЧХ коды с  $t_i \leq 3$  ( $d_i = 7$ ) в виде трех триплетов: (23, 12, 7), (31, 16, 7), (63, 45, 7). Все они обеспечивают передачу транзакций с требуемой достоверностью, при этом триплет (63, 45, 7) более предпочтителен. Он дает наименьший фактический объем транзакций на уровне 1512 бит;

- для организации работы мехатронной системы на каналах при  $P_{\text{ош}} \leq 10^{-3}$  могут быть применены БЧХ коды с  $t_i \leq 3$  ( $d_i = 7$ ) в виде четырех триплетов: (23, 12, 7), (31, 16, 7), (63, 45, 7), (127, 106, 7). Все они обеспечивают передачу транзакций с требуемой достоверностью, при этом код (127, 106, 7) более предпочтителен. Он дает наименьший фактический объем транзакций на уровне 1275 бит.

Таблица 1

Скорости битовых ошибок $P_{\text{ош}}$ в канале	Триплеты БЧХ-кода				
	23, 12, 7	31, 16, 7	63, 45, 7	127, 106, 7	255, 231, 7
$1 \cdot 10^{-6}$	+	+	+	+	+
$5 \cdot 10^{-6}$	+	Область обеспечения предельно допустимых вероятностей наличия остаточных ошибок в кодовых блоках			+
$1 \cdot 10^{-4}$	+				+
$5 \cdot 10^{-4}$	+				+
$1 \cdot 10^{-3}$	+				-
$5 \cdot 10^{-3}$	+	+	+	-	-
$1 \cdot 10^{-2}$	+	+	-	-	-
$5 \cdot 10^{-2}$	-	-	-	-	-
Вероятность наличия остаточных ошибок в кодовом блоке при $t_i \leq 3$	0,026 при $P_{\text{ош}} > 5 \cdot 10^{-2}$	0,067 при $P_{\text{ош}} > 5 \cdot 10^{-2}$	0,025 при $P_{\text{ош}} \geq 1 \cdot 10^{-2}$	0,004 при $P_{\text{ош}} \geq 5 \cdot 10^{-3}$	0,00014 при $P_{\text{ош}} \geq 1 \cdot 10^{-3}$

Представленные результаты являются срединными; граница выделенной допустимой области задается последней строкой таблицы 1. Дополнительные расчеты показали, что уменьшение или увеличение вероятности  $P_{\text{дост}}$  сопровождается соответствующим активным расширением или сужением допустимой области. В то же время эффект от применения триплетов со значениями  $t_i \leq 4$  ( $d_i = 9$ ) невысок – наблюдается лишь незначительное расширение допустимой области.

УДК 004.932.2

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПЛИТКИ ПРИ ЕЁ ДВИЖЕНИИ ПО КОНВЕЙЕРУ

*Лозовский В.Э., Мацукевич В.Ю., Лившиц Ю.Е.*  
Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

На сегодняшний день важнейшей из проблем при производстве керамической плитки является проведение разгрузочно-упаковочных работ. В силу принципа упаковки готовых изделий и устройства печи обжига выходной поток плиток с роликового печного конвейера переходит под прямым углом на ленточный разгрузочный конвейер с последовательным расположением плиток.

В процессе продвижения плиток в печи, покрытых слоем глазури, возникает их слипание между собой. Изменение загруженности печи и динамика температуры в ней приводит к поверхностной деформации конвейерных роликов. Так же в процессе обжига плитки происходит её усадка в размерах, что приводит к повороту плитки в потоке. На выходе из печи располагается разгрузочный конвейер, в ходе движения к которому возможны сильный поворот и налегание плиток друг на друга. Эти условия создают аварийные состояния, приводящие к заклиниванию оборудования.

Для решения задачи детектирования аварийных ситуаций была разработана система технического зрения, отслеживающая состояние передвижения плитки. Работа системы была описана в [1]. Основной работы системы контроля потока движения керамической плитки является программное обеспечение, осуществляющее обработку изображений, описанное в данной работе. В процессе работы системы анализируется состояние конвейера в момент подхода плитки к стопорному ножу (смотри рисунок 1).

Алгоритм анализа изображения основан на ряде математических операций:

- выделение на изображении области интереса;
- компенсация неравномерности освещённости;
- выделение краёв плитки, основанное на дискретном косинусном преобразовании;
- пороговая бинаризация и связывание пикселей в объекты;
- анализ геометрических параметров связанных областей;
- выдача результата обработки.

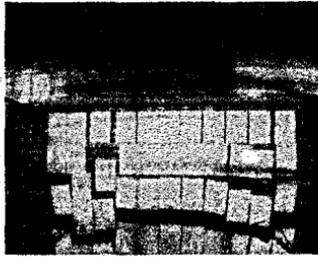


Рисунок 1 – Рабочий кадр, захваченный в момент формирования ряда

Из снимка выделяется область интереса – сформированный ряд. Это делается с целью уменьшения вычислительной нагрузки, а так же для исключения влияния посторонних факторов на автоматический процесс подбора параметров, необходимых для операций фильтрации и бинаризации. Выделенная область, используемая в дальнейшей обработке, представлена на рисунке 2,а.

Для определения наличия и характера неравномерности интенсивности использован подход с применением моделей интенсивности. На основании оценки модели опробуются различные уравнения пространственной коррекции освещения.

При исследовании проблемы коррекции были опробованы различные уравнения модификации пространственного распределения яркости. Наиболее эффективными функциями в отношении ослабления влияния источников освещения показали себя функции вида (1)

$$I(i) = \frac{I_0(i)}{1 + K_1 * \cos\left(i * \frac{\pi}{K_2}\right)}, \quad (1)$$

где  $i$  – порядковый номер пикселя в строке матрицы интенсивности,  $I$  – интенсивность пикселя после процедуры коррекции,  $I_0$  – исходная интенсивности пикселя,  $K_1, K_2$  – весовые коэффициенты, устанавливаемые в ходе эксперимента.

Последующим этапом обработки изображения является выделение краёв. На начальном стадии поиска решения данного вопроса был опробован ряд зарекомендовавших себя в задачах выделения краёв универсальных методов [2]:

- фильтрация изображения оператором Собеля;
- детектор границ Кэнни;
- фильтрация изображения фильтром LoG (Laplacian of Gaussian).

Неустойчивость к шуму вследствие проблем, возникающих при естественном освещении на первых этапах эксперимента (тени, изменения светового потока в течение дня и др.), приводила в итоге к неудовлетворительным результатам работы системы в целом. С учётом вышесказанного был разработан метод выделения границ на основе дискретного косинусного преобразования Фурье с использование плавного усиления. В результате было получено изображение (представлено на рисунке 2,в).

Дальнейшим этапом является бинаризация изображения методом Отса [3] с целью выделения граничных элементов и отсеиванию промежуточных. Результат процедуры бинаризации продемонстрирован на рисунке 2, г.

Для связывания пикселей в работе использована восьмисвязность в виду необходимости плотного соединения пикселей в регионы. Затем регионы анализируются как цельные объекты для подсчёта их геометрических характеристик. Геометрическими характеристиками, используемыми при анализе, являются координаты центра масс, длина максимальной оси инерции, ориентация и количество пикселей в объекте.

Из рассмотрения исключаются области, имеющие минимальную ось инерции менее 25 пикселей, что соответствует шумам на изображении. Таким образом, результирующее изображение имеет вид, отраженный на рисунке 2, д.

Дальнейшему анализу поддается ориентация линий. При отклонении линии более чем на 10 градусов относительно вертикали программа выдаёт сигнал на вход модуля дискретного канального ввода/вывода.

Результат работы системы был оценен в течение двух суток с учётом восхода солнца, чтобы полностью исключить влияние естественного вмешательства Солнца. Первый период включал в себя работу системы с 23:00 до 6:00. За это время было проанализировано 2656 снимков на предмет правильного формирования ряда у стопорного ножа. Второй период охватывал время с 1:00 до 5:00 следующего дня. За время второго периода было проанализировано 1340 кадров.

В этом интервале времени (2656 и 1340 снимков) ошибка детектирования возникла 13 раз (3 и 10 раз за описанные периоды соответственно), что соответствует весу ошибки в 0.3253%. То есть каждые 308 кадров (примерно 1 раз в час). Столь точный результат оправдывает разработку системы контроля в полной мере.

Области интересов рабочих кадров для аварийного и неаварийного состояния и результат работы алгоритма представлены на рисунке 3.

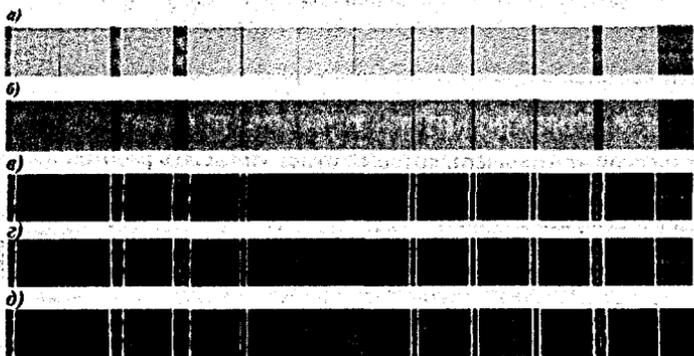


Рисунок 2 – Область интереса исходного кадра (а); результат корректирования интенсивности (б); результат дискретного косинусного преобразования Фурье (в); результат бинаризации (г); результирующее изображение (д)

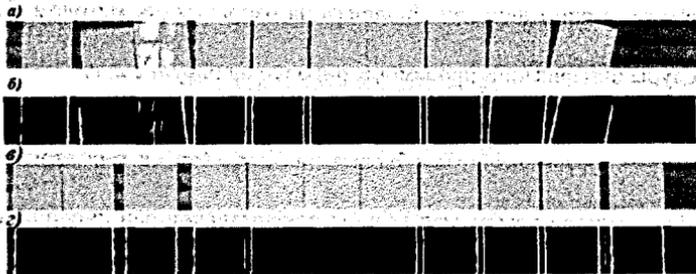


Рисунок 3 – Область интереса с рабочего кадра при аварийном повороте плиток (а) и результат обработки (б). Область интереса с рабочего кадра при корректном расположении плиток (в) и результат обработки (г)

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лозовский, В.Э. Система технического зрения для детектирования аварийных ситуаций на разгрузочном конвейере керамической плитки / В.Э. Лозовский, Р.В. Новичихин. – Минск: Сборник 70 СНТК 2014 (в печати).
2. Гонзалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонзалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
3. Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1979. – Vol. 9, no. 1. – P. 62-66.

УДК 004.42

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНО-СУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

*Швед А.А., Здор Г.Н.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Задачей является разработка системы управления для контроля и управления технологическим процессом очистки, сушки и хранения зерна.

Для этих целей необходимо выбрать управляющий элемент (программируемый логический контроллер), который будет управлять работой всего оборудования (конвейеры, норрии, задвижки и т.д.) и обрабатывать показания датчиков. Необходимо выбрать датчики и другое оборудование для управления данным технологическим процессом. Также следует создать алгоритм работы контроллера и написать программу для автоматического контроля и управления работой комплекса.

Для диспетчеризации ручного и автоматического управления необходимо разработать SCADA-систему, которая, взаимодействуя с контроллером, сможет осуществлять управление технологическим процессом, средства сигнализации для обеспечения оперативной реакции дежурного персонала на возникновение аварийных и нестандартных ситуаций. Внедрение SCADA-системы долж-

но расширить функциональные возможности системы контроля технологического процессом сушки и хранения зерна в автоматическом режиме.

Управляющая программа для ПЛК разработана с помощью инструментального программного комплекса CoDeSys.

Комплекс CoDeSys разработан фирмой 3S (Smart Software Solutions). Это универсальный инструмент программирования контроллеров и встраиваемых систем на языках МЭК 61131-3, не привязанный к какой-либо аппаратной платформе и удовлетворяющий современным требованиям быстрой разработки программного обеспечения.

Подпрограмма PLC\_PRG (рисунок 1) является основной и содержит в себе все остальные программы для опроса входов, выбора режимов работы, изменения состояния механизмов, вывода сигналов управления и т.д., а также для обмена данными с ПК, на базе которого была написана SCADA – система.

Управляющая программа для ПЭВМ разрабатывается с помощью пакета Microsoft Visual Studio 2010.

Microsoft Visual Studio – линейка продуктов компании Майкрософт, включающих интегрированную среду разработки программного обеспечения и ряд других инструментальных средств. Данные продукты позволяют разрабатывать как консольные приложения, так и приложения с графическим интерфейсом, в том числе с поддержкой технологии Windows Forms, а также веб-сайты, веб-приложения, веб-службы как в родном, так и в управляемом кодах для всех платформ, поддерживаемых Microsoft Windows, Windows Mobile, Windows CE, .NET Framework, Xbox, Windows Phone .NET Compact Framework и Microsoft Silverlight.

Сама программа представляет собой Windows-приложение, написанное на языке C#. Разработка «своей» SCADA-системы – процесс достаточно трудоемкий, однако это позволяет сэкономить значительную часть средств, затрачиваемых на разработку автоматизированной системы управления.

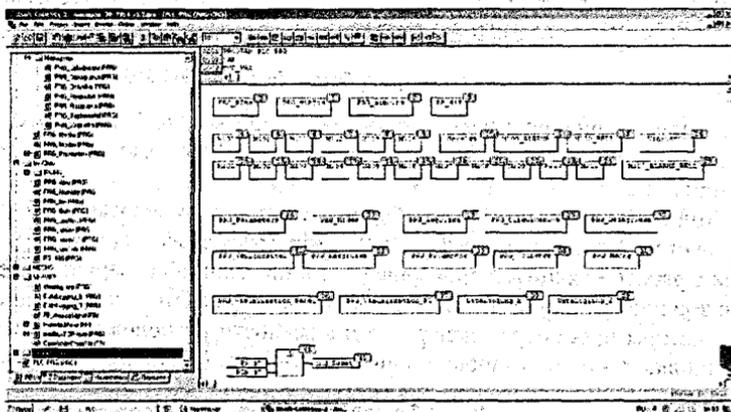


Рисунок 1 – Среда разработки CoDeSys (подпрограмма PLC\_PRG)

В результате разработанная SCADA-система ничем не уступает специализированным аналогам, в ней реализованы все функции, присущие современным системам.

Внешний вид окна среды разработки Visual Studio 2010 приведен на рисунке 2.

Разработанное программное обеспечение (далее ПО) предназначено для работы в составе системы управления (СУ) комплекса зерноочистительно-сушильного ЗСК-30ША (в дальнейшем – комплекс).

ПО обеспечивает возможность:

- контролировать работу комплекса из операторской при помощи ПЭВМ во всех режимах;
- управлять работой комплекса в режиме «Автоматический» (с ПЭВМ);
- просматривать данные о температурах, включении/выключении исполнительных механизмов, срабатывании датчиков и элементов защиты, действиях оператора. Данные сохраняются в памяти ПЭВМ, только если ПО запущено в работу и имеется связь ПЭВМ со шкафом управления отделением сушки.

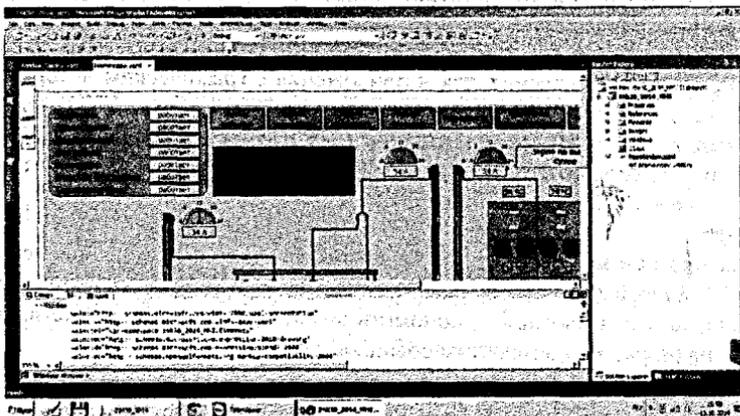


Рисунок 2 – Среда разработки Visual Studio 2010

Вид главного окна программы представлен на рисунке 3. Мнемосхема занимает центральную часть экрана и представляет собой схематическое изображение комплекса.

В исходном состоянии все устройства и механизмы комплекса изображаются серым цветом. Работаящие механизмы изображаются зеленым цветом.

Если в работе механизма произошел сбой, приведший к аварийному останову механизма или маршрута, то такой механизм изображается красным цветом.

Индикаторы просмотра температур и влажности расположены на изображении сушилки в месте установки данных датчиков. Индикаторы просмотра нагрузок норий расположены рядом с соответствующими нориями.

Индикатор количества открытых выгрузного устройства, а также кнопка обнуления этого количества (кнопка «Сброс») расположены под сушилкой.

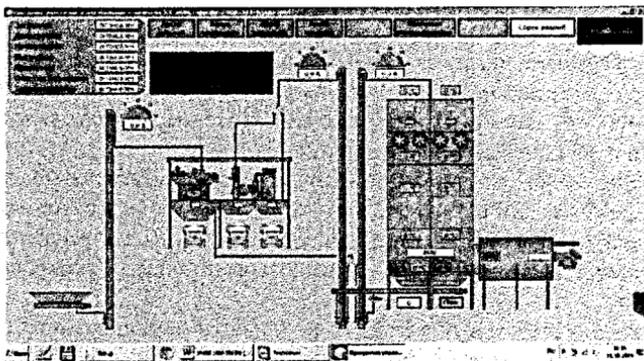


Рисунок 3 – Вид главного экрана

В ходе исследования предметной области выявлено, что устаревшее оборудование, высокая аварийность и низкий уровень автоматизации создают серьезные проблемы для качественной очистки и сушки зерна. В связи с этим была разработана автоматизированная система управления зерносушильно-очистительным комплексом.

Были реализованы мониторинг и диспетчеризация наиболее важных параметров зерносушильно-очистительного комплекса на базе SCADA системы. Это предоставило оператору возможность удаленного управления оборудованием, качественно контролировать протекание технологического процесса. При этом обеспечиваются визуализация работы всех составных частей комплекса, маршрутов движения зерна, управления, комплексная обработка и хранение информации.

Программа управления полностью протестирована на работоспособность всех имеющихся в ней команд и запросов и используется по назначению.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Троелсен, Э. Язык программирования C# 2010 и платформа .NET 4/ -М.: Издательство «Вильямс», 2010. – 1392 с.

УДК 004.42

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОДЪЕМА ПОДВЕСКИ АВТООПЕРАТОРА ДЛЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ ДО 250 КГ

*Овцов С.А., Карнович Д.С., Сарока В.В.*

Белорусский государственный технологический университет  
Минск, Республика Беларусь

Работа порталного автооператора гальванической линии имеет строго циклический характер, при этом переходные режимы движения их механизмов занимают значительную часть от всей длительности рабочего цикла автооператора.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ  
Брестского государственного  
технического университета

ра. Одним из способов повышения эффективности работы автоматизированной гальванической линии является оптимизация переходных режимов движения автооператора с подвеской. Стоит отметить, что производительность, надежность, безопасность эксплуатации порталных автооператоров зависят от инерции подвески с обрабатываемыми деталями [1].

Раскачивание подвески с грузом, которое возникает в течение переходных режимов движения автооператора, является причиной его неравномерного движения, дополнительных нагрузок на элементы привода автооператора. Это угрожает ведению безопасного технологического процесса и сокращает производительность.

Колебания подвески могут затруднять точность установки подвески на заданной позиции над соответствующей ванной. Особенно это относится к крупногабаритным, длинномерным и тяжелым обрабатываемым деталям. Колебательный характер движения подвески может вносить неопределенность в программу автоматизированной работы автооператора. Кроме того, значительно возрастают динамические нагрузки на элементы привода и металлоконструкцию автооператора.

Для процесса опускания груза в течение торможения рамы автооператора можно использовать аппарат динамического программирования. При этом динамика подъема или опускания груза описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \dot{x}_1 + m_2 \dot{x}_2 = F - W \operatorname{sign} \dot{x}_1, \\ \ddot{x}_2 + \frac{g}{l} (x_2 - \bar{o}_1) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $m_1, m_2$  – приведенная массы элементов автооператора при допущении о использовании двухмассовой модели;

$x_1, x_2$  – координаты центров масс элементов;

$g$  – ускорение свободного падения;

$l$  – длина связи элементов,

$F$  – суммарное тяговое/тормозное усилие, действующее на систему;

$W$  – приведенная сила сопротивления перемещению системы.

$\bar{o}_1$  – отклонение подвески от вертикали.

Однако мы используем другой критерий оптимизации для работы механизма подъема/опускания груза. Это связано с тем, что подъем и опускание – это законченные процессы, которые состоят из разгона груза, движения на номинальной скорости и торможения (в вертикальном направлении). Можно оптимизировать каждый из этих этапов, и, конечно, оптимизация разгона и торможения иметь решающее значение с точки зрения динамики и энергетики процесса опускания груза. Поставим простую задачу - оптимизировать весь цикл опускания груза, не разделяя его на отдельные этапы.

Для описания динамики движения груза в вертикальном направлении используем двухмассовую динамическую расчетную модель (рис. 1).

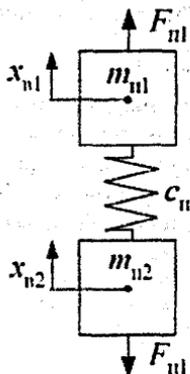


Рисунок 1 – Динамическая расчетная схема механизма подъема подвески автооператором

Эта модель описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{n1} \ddot{x}_{e1} = F_{n1} - c_n (x_{e1} - x_{e2}); \\ m_{n2} \ddot{x}_{e2} = c_n (x_{e1} - x_{e2}) - F_{n2}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $m_{n1}$  – приведенная к поступательному движению масса системы "двигатель-рама";

$m_{n2}$  – приведенная к поступательному движению масса системы "груз-подвеска";

$x_{e1}, x_{e2}$  – координаты центров масс соответственно  $m_{n1}, m_{n2}$ ;

$F_{n1}$  – приведенная к канату сила от действия движущего момента на валу двигателя;

$F_{n2}$  – приведенная к канату сила тяжести груза;

$c_n$  – приведенная жесткость канатно-полиспастной системы.

В течение процесса опускания груза на подвеске возникают колебания, которые негативно влияют на показатели надежности. Поэтому желательно выбирать такие режимы работы механизма подъема и опускания груза, чтобы уменьшить эти нагрузки. Поэтому для процесса опускания груза используем критерий:

$$I_B = \int_0^T [c_n (x_{1B} - x_{2B})]^2 dt \cong \int_0^T (\ddot{x}_{2B})^2 dt. \quad (3)$$

Для минимизации этого критерия можно использовать метод динамического программирования. Однако в данном случае это нецелесообразно, поскольку здесь необходимо использовать четыре фазовые координаты (перемещения и скорости  $m_{11}$  и  $m_{12}$ ) и функция S Беллмана будет зависеть от четырех аргументов, что значительно усложнит решение основного функционального уравнения динамического программирования. Поэтому используем для этой задачи классическое вариационное исчисление [2].

Условием минимума критерия (3) есть уравнение Эйлера-Пуассона:

$${}^n x_{2B} = 0. \quad (4)$$

Порядок этого уравнения требует постановки четырех краевых условий, которые не удовлетворяют физическим условиям движения механизма подъема/опускания груза. Целесообразно минимум критерия (3) искать в более широком классе функций. Используем прямой метод решения вариационной задачи, для этого найдем решение трехточечной краевой задачи. Сначала проинтегрируем дифференциальное уравнение:

$${}^n x_{2B} = 0, \quad (5)$$

с учетом краевых условий:

$$\begin{cases} x_{2B}(0) = l_0, \dot{x}_{2B}(0) = 0; \ddot{x}_{2B}(0) = 0; \ddot{\ddot{x}}_{2B}(0) = 0; x_{2B}^n(0) = 0; \\ x_{2B}\left(\frac{T_1}{2}\right) = q_1, \dot{x}_{2B}\left(\frac{T_1}{2}\right) = q_2; \\ x_{2B}(T) = l, \dot{x}_{2B}(T) = 0; \ddot{x}_{2B}(T) = 0; \ddot{\ddot{x}}_{2B}(T) = 0; x_{2B}^n(T) = c \end{cases} \quad (6)$$

Постановка таких начальных и конечных условий позволяет устранять высокочастотные колебания груза в вертикальном направлении. Кроме того, функция динамической составляющей приводного усилия имеет нулевые начальные и конечные значения, что улучшит динамику механизма подъема/опускания груза, исключит удары в кинематических парах и т.д. Постановка двух условий по середине интервала  $[0, T_1]$  будет понятна из дальнейшего изложения [3].

Решение краевой задачи (5) – (6) представляется в виде:

$$x_{2B} = x_{2B}(t, T_1, q_1, q_2). \quad (7)$$

Найдем вторую производную от  $x_{2B}$  по времени и подставим в подынтегральное выражение критерия (3). В результате получим выражение:

$$I_B = I_B(T_1, q_1, q_2). \quad (8)$$

Условием минимума полученного выражения критерия  $I_B$  является система алгебраических уравнений:

$$\frac{\partial I_B}{\partial q_i} = 0, i = 1, 2. \quad (9)$$

Подставим результаты системы алгебраических уравнений в решение краевой задачи, получим функцию, которая описывает движение подвески в вертикальном направлении.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карлович, Д.С. Структурный синтез САУ автооператора для гальванических линий цеха анодирования СП «КТМ 2000» / Д.С. Карлович, В.В. Сарока, И.Ф. Кузьмицкий, О.Г. Барашко // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий: материалы 3-го Республиканского науч.-технич. семинара, Минск, 5-6 декабря 2013 г. – Минск: БГТУ, 2013. – С. 88-91.

2. Ловейкин, В.С. Комплексный синтез оптимального управления движением грузоподъемного крана / В.С. Ловейкин, Ю.О. Ромасевич // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. – Киев, 2011.

3. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Физматгиз, 1961. – 392 с.  
УДК 004.942

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В КРУГЛЫХ ДИСКОВЫХ ПИЛАХ

*Суша О.Н., Карпович Д.С.*

Белорусский государственный технологический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Основу проблемы оценки работоспособности инструмента при любом подходе к ее решению составляет анализ напряженного состояния круглой дисковой пилы. Задача сводится к составлению функциональных зависимостей, устанавливающих связь между напряжениями и нагрузочными факторами, которые определяют режимы пиления, конструкцию пилы, качество материала пилы, качество ее подготовки к работе. Построение таких зависимостей на основе точных решений имеет значительные математические сложности. Это связано со сложностью характера нагрузочных факторов, которые не всегда имеют линейную связь с напряжениями в пиле, и со сложностью геометрической формы зубчатой кромки пилы. Эти обстоятельства послужили причиной широкого применения экспериментальных методов (оптических или тензометрических) определения напряжений. Аналитические работы, касающиеся вопросов определения напряженного состояния дисковых пил, связаны в основном с решением проблемы устойчивости и колебаний. При этом пила рассматривается как диск с гладким внешним контуром, так как на современном этапе построение аналитических решений с учетом реальной геометрии зубчатой кромки не представляется возможным [1].

Так как на данный момент аналитическое решение невозможно, рассмотрим численный метод исследования напряженного состояния круглой дисковой пилы. В настоящее время возможно использование современных компьютерных пакетов предназначенных для моделирования поведения дереворежущего инструмента[3]. Одним из таких пакетов является ANSYS. В данной программе был промоделирован процесс резания круглой пилой и представлено численное решение распределение напряжения дереворежущего инструмента.

Одним из этапов подготовки к проведению расчета и получения удовлетворительных результатов является определение внешних воздействий (механических, тепловых) на конструкцию[3].

При продольной круглопильной распиловке древесины в пропиле одновременно действуют на один зуб пилы касательные, нормальные и боковые силы [1]. Пример графического окна с приложенными к модели нагрузками представлен на рисунке 1.

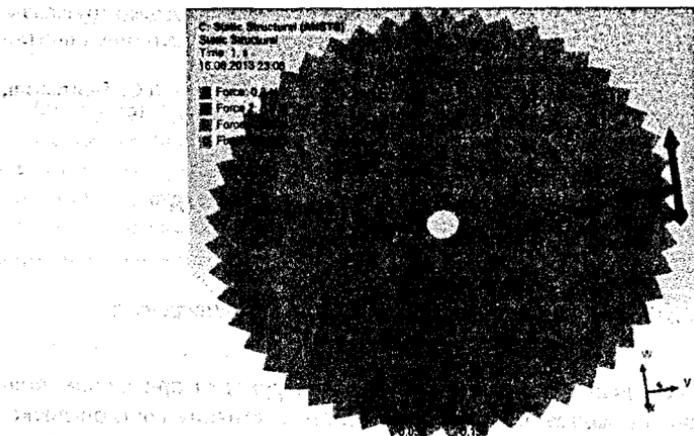


Рисунок 1 – Нагрузки, приложенные к зубу круглой пилы

Программа ANSYS позволяет получить реакцию модели круглой дисковой пилы на приложенные к ней касательной, боковой, а также нормальной силы при малых величинах (рисунок 2).



Рисунок 2 – Напряжение в круглой пиле при малых величинах действия на зуб касательной нормальной и боковой сил

Напряженное состояние при этом возникает непосредственно на поверхности режущего элемента, однако имеет место распространение напряженного состояния на зубчатый венец в зонах двух соседних режущих элементов [2]. Напряженное состояние при этом не передается на основное полотно дисковой пилы, а концентрируется в небольшой области на расстоянии  $r=0.1R$ .

Напряженное состояние при больших величинах действующих сил на круглую дисковую пилу имеет место в зоне насадки круглой дисковой пилы на вал (рисунок 3).

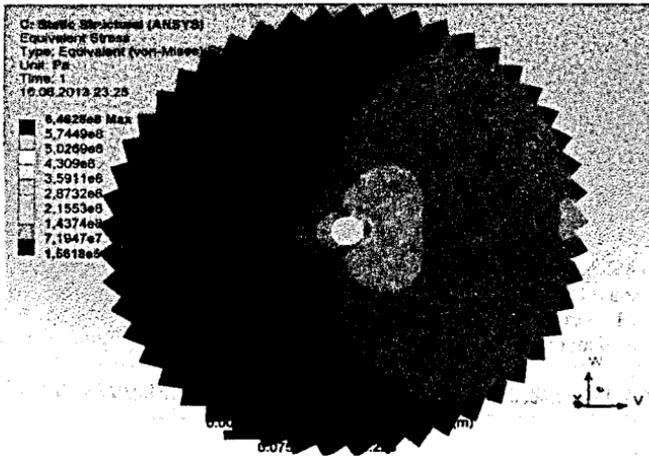


Рисунок 3 – Напряжение в круглой пиле при действии на зуб касательной нормальной и боковой силы и напряжение при больших величинах действующих сил на круглую пилу

Жёсткость вращающейся круглой пилы (если внутренние напряжения в ней соответствуют оптимальным значениям) в принципе должна быть больше, чем у пилы в покое. Постоянно действующая боковая сила может быть источником возбуждения и поддержания в пилах неподвижных в пространстве волн. Возникновение стоячей волны в дереворежущем инструменте сопровождается её значительным отгибом в боковом направлении и, как следствие, снижением жёсткости (при постоянной действующей поперечной силе).

Диск становится неустойчивым, и даже незначительные поперечные силы резания приводят к потере плоской формы пилы. Пила зарезает. Это особенно важно у тонких пил и пил большого диаметра. Правильно прокованные (или провальцованные) круглые пилы могут работать при большей частоте вращения и выдерживают большой перепад температуры периферийной и средней частей диска. В любом случае частота вращения вала круглопильного станка не должна превышать критическую.

Следует отметить, что, кроме создания внутренних напряжений проковкой и вальцеванием, устойчивость круглых пил может быть повышена также за счет выравнивания температуры диска. Выравнивать температуру можно нагревом центральной части или охлаждением периферии пилы. Вредное влияние термических напряжений может быть уменьшено при устройстве щелевых компенсаторов в диске пилы. Чаще всего этот прием употребляют в пилах с пластинками из твердого сплава, так как компенсаторы позволяют уменьшить деформацию пилы в процессе напайки пластин.

С возникновением напряжений можно бороться, создавая и «противонапряжения», проковкой или вальцеванием инструмента. Но при «противонапряжении» величина напряжений противодействует деформации инструмента, и не будет изменяться при смене режимов резания. Наличие уширяющих элементов, выполненных из материала с более высокими температурными коэффициента-

ми линейного расширения, приводит к динамическому изменению величин противонапряжений и в результате обеспечивает более корректную стабилизацию полотна в пропилах. Предложенный способ натяжения зубчатого венца характеризуется простотой и обеспечивает возможность создания напряженного состояния зубчатого венца в пилах большего диаметра и твердосплавных непосредственно на деревообрабатывающих предприятиях.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Санёв, В.И. О поперечной жёсткости дисковых пил в покое и при вращении / В.И. Санёв, В.К. Пашков // Изв. вузов: Лесной журнал. – 1970. – №3.
2. Суша, О.Н. Установка для исследования статической устойчивости круглых пил / О.Н. Суша, Д.С. Карлович // Энергия - 2013: материалы конф., 23-25 апреля 2013г. / ИГЭУ. – Иваново, 2013.
3. Басов, К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS. – М.: ДМК Прес, 2006. – 248 с.

УДК 681.5.03

### ПОДБОР МОДЕЛИ ПРИВОДА МАЛОМОЩНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ РАЗГОНЕ И ТОРМОЖЕНИИ

*Морозова М.П., Оробей И.О., Гринюк Д.А.*

Белорусский государственный технологический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Как известно, для получения параметров настроек контура регулирования стабилизации частоты вращения требуется знать динамические характеристики объекта управления. В качестве объекта управления выступает маломощный двигатель постоянного тока с независимым возбуждением ДПР-42-Ф1-02. Датчиком частоты являлся практически такой же двигатель в режиме генератора, который жестко соединен с валом ведущего двигателя.

В качестве управляющей системы в контуре выступает Arduino. Напряжение с генератора через делитель для согласования диапазона подключено на АЦП вход микроконтроллера. В свою очередь PWM выход контроллера через силовой драйвер формирует напряжение для двигателя.

Наиболее часто в литературе можно встретить передаточную характеристику двигателя постоянного тока при моменте сопротивления  $M_n$  равном нулю как

$$W(s) = \frac{k_1}{T_E T_M s^2 + T_M s + 1},$$

где  $s$  – оператор Лапласа,  $T_E$ ,  $T_M$  – соответственно электрическая и механическая постоянные.

Однако проведенные эксперименты показали наличие существенных нелинейных свойств в динамике микромощного электропривода.

Согласно программе микроконтроллер формировал меандровый сигнал с частотой для выхода частоты на стационарное значение. Кривые торможения и разгона фиксировались с помощью цифрового осциллографа (рисунки 1-2).

Результаты эксперимента пытались аппроксимировать рядом передаточных функций с запаздыванием, получив общий вид теоретического решения от реакции передаточной функции на единичный скачок.

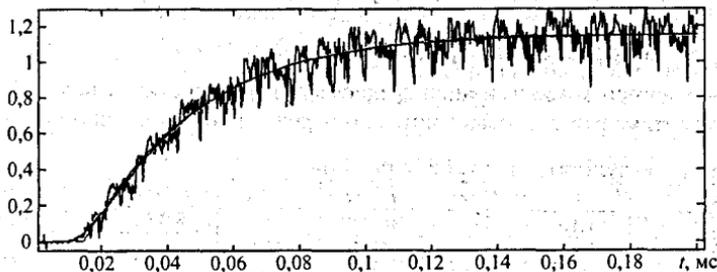


Рисунок 1 – Кривая разгона и результат ее аппроксимации

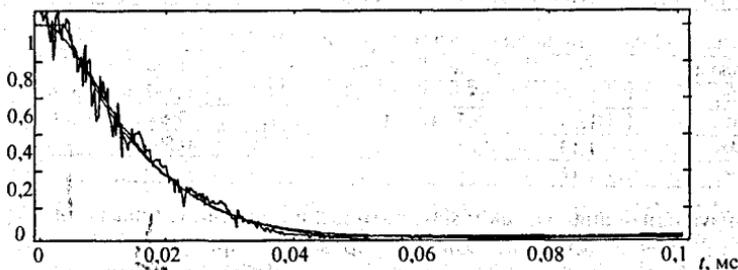


Рисунок 2 – Кривая торможения и результат ее аппроксимации

$$W_1(s) = \frac{k \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)}$$

и ее решение

$$y(t) = k \left( 1 - C_1 \exp\left(-\frac{(t-\tau)}{T_1}\right) - C_2 \exp\left(-\frac{(t-\tau)}{T_2}\right) - C_3 \exp\left(-\frac{(t-\tau)}{T_3}\right) \right);$$

$$W_2(s) = \frac{k(T_3 s + 1) \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

и ее решение

$$y(t) = k \left( 1 - C_1 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) - C_2 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_2}\right) \right)$$

$$W_3(s) = \frac{k(T_3 s + 1) \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)^2 (T_2 s + 1)}$$

и ее решение

$$y(t) = k \left( 1 - C_1 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) - (C_2 + bt) \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_2}\right) \right);$$

$$W_4(s) = \frac{k \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

и ее решение

$$y(t) = k \left( 1 - C_1 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_1}\right) - C_2 \exp\left(-\frac{t-\tau}{T_2}\right) \right),$$

где  $C_1, C_2, b$  – коэффициенты, определяемые через  $T_1, T_2, T_3$ .

Используя алгоритм минимизации среднеквадратичного отклонения (СКО), были найдены оптимальные коэффициенты для передаточной функции (табл. 1-2).

Таблица 1 – Результаты для кривой разгона

Модель	$k$	$T_1, \text{мс}$	$T_2, \text{мс}$	$T_3, \text{мс}$	$\tau, \text{мс}$	СКО $\cdot 10^{-3}$
$W_1$	1,16	31,0	0,869	7,64	8,37	5,92
$W_2$	1,15	62,4	42,4	75,1	14,4	5,98
$W_3$	1,13	0,552	21,6	8,43	11,5	5,96
$W_4$	1,16	31,6	6,89	-	9,65	5,92

Таблица 2 – Результаты для кривой торможения

Модель	$k$	$T_1, \text{мс}$	$T_2, \text{мс}$	$T_3, \text{мс}$	$\tau, \text{мс}$	СКО
$W_1$	1,16	7,87	0,0699	7,68	0,543	653,18
$W_2$	1,15	56,7	16,2	71,1	3,88	605,10
$W_3$	1,13	8,05	8,04	8,55	0,597	652,91
$W_4$	1,16	7,79	7,77	-	0,613	653,14

Как визуальный анализ, так и математический результат показывают существенные отличия в динамике объекта управления при увеличении частоты и уменьшении. С хорошей точностью (особенно кривая торможения) динамики аппроксимируется характеристика аperiodическими звеньями 2-3 порядка, однако общая динамика более сложна. Наибольшие погрешности наблюдаются на начальном участке, особенно для кривой разгона.

Сильнее всего изменяется механическая составляющая динамики и время запаздывания, что связано, скорее всего, с нелинейным влиянием сил трения и силового драйвера схемы.

УДК 681.5

## АНАЛИЗ КРИТЕРИЯ СЕРИЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРОГРАММИРУЕМЫМ КОНТРОЛЛЕРАМ

*Сухорукова М.П., Шитик А.М., Оробей И.О., Гринюк Д.А.*  
Белорусский государственный технологический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Наличие автоматизации технологических процессов стало обязательным условием в современных экономических условиях. Период экстенсивного пути повышения уровня автоматизации за счет установки измерительных приборов с необходимой точностью и настройкой локальных контуров практически завершился. В настоящее время уже недостаточно просто настроить пропорциональ-

но-интегрально-дифференциальный регулятор. Получение конкурентных преимуществ требует применения более сложных алгоритмов, адаптации локальных контуров под действием изменяющихся контуров и оптимизации в реальном времени. В англоязычной литературе возник специальный термин: усовершенствованное управление Advanced Process Control (APC) [1, 2].

На сегодняшний момент основные задачи управления реализуются с помощью программируемых логических контроллеров (ПЛК) для построения распределенных систем управления (PCU). Вычислительные ресурсы разных классов ПЛК существенно отличаются. Контроллеры с высоким уровнем ресурсов, которые могут решать широкий класс задач управления, имеют более высокую стоимость. Это является следствием требования по обеспечению работы ПЛК в режиме реального времени. В то же время основную нагрузку по управлению в промышленности выполняют контроллеры с малой и средней вычислительной мощностью, в которых имеется ограничение на объем памяти и реализацию алгоритмов теории управления [3].

Одной из возможностей предсказания смены режимов работы настроек системы регулирования при ограничении на вычислительные мощности является использование критерия серий для выявления изменений трендов. Исследования [4] по критерию серий проводились в условиях воздействия на информационный поток случайного процесса, сгенерированного с помощью программы MatLAB. Известно, что результаты, апробированные на математических моделях, нередко расходятся с данными, полученными на реальных объектах. Чаще всего математический аппарат лучше адаптирован к работе с нормальным распределением случайных величин, которое не всегда выполняется в реальных процессах. Применение критерия серий позволяет реальные данные преобразовать в промежуточные, для которых соблюдается нормальное распределение.

С целью адаптации критерия серий был проведен ряд экспериментов, базой для которых служил контроллер VIPA 200V. Он относится к серии средних ПЛК и может реализовать алгоритмы ПИД-регулирования и цифровой фильтрации. Время выполнения операции с битами – 0,25 мкс, со словами – 1,2 мкс. Объем памяти: 48 кВ рабочая память, 80 кВ загрузочная память [3].

Контроллер подключен к оборудованию с тепловыми нагревателями, которые обдувались потоком воздуха. Скорость потока регулировалась путем изменения частоты вращения двигателя вентилятора. В качестве информативных параметров использовались температура воздуха на входе и выходе, информация о частоте с привода напрямую и через вторичный преобразователь.

Контроллер имеет два вида входных аналоговых модулей. Один из модулей имеет 12-битовый выходной цифровой код с максимальным значением 16 384, но с учетом того, что три младших разряда всегда имеют нулевое значение, то весь диапазон разбивается всего на 2048 уникальных комбинаций цифрового кода. У другого модуля контроллера максимальное значение сигнала 27 648. В нашем случае ко второму модулю подключен термометр сопротивления с градуировкой Pt100 и младшему значащему разряду (МЗР) соответствует температура 0,1°C. Однако, как и в первом случае, часть младших разрядов также за-

полняется нулями. С точки зрения устойчивости использования результатов подобных данных в контурах регулирования, их обычно сглаживают с помощью фильтров. Наиболее простым решением является использование экспоненциального фильтра или скользящего среднего. Поэтому в контроллере для потока 1 были реализованы различные варианты фильтрации. Время дискретизации настраивалось с помощью встроенного механизма организационного блока ОВ35, который устанавливает время дискретизации  $h = 500$  мс как для экспоненциального фильтра с постоянными времени  $T = 10$  с или  $T = 100$  с, так и для скользящего среднего с длиной 6.

Термометр сопротивления на входе в объект через интеллектуальный вторичный прибор, настроенный на диапазон  $0-150^{\circ}\text{C}$ , подключался к модулю с 12-битовым АЦП и МЗР  $\approx 0,073^{\circ}\text{C}$ . К этому модулю был подключен и сигнал с частотного привода через вторичный прибор с МЗР  $\approx 0,024$  Гц. Сигнал о частоте напрямую с привода позволял получить МЗР  $\approx 0,0018$  Гц.

Управление и фиксация данных осуществлялись с помощью MatLab по структуре обмена данными. Опрос данных происходил с частотой 0,1 с. Исходные данные с входных регистров одновременно пропускались через фильтры низкой частоты с постоянными времени 10 и 100 с. Работа критерия оценивалась в условиях ступенчатого изменения сигнала задания по частоте с различным размахом, а также при плавном подъеме и опускании частоты с различной скоростью нарастания. Основные тренды изменения температуры на выходе  $\theta_{out}$  и входе  $\theta_{in}$  представлены на рис. 1 и 2.

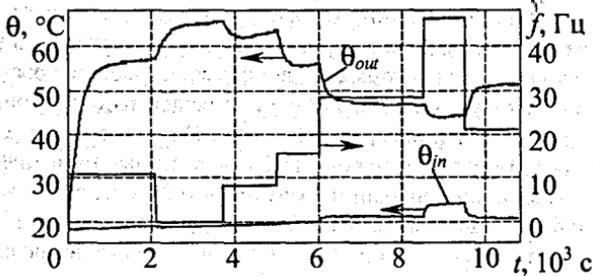


Рисунок 1 – Переходные процессы на объекте при ступенчатом изменении частоты

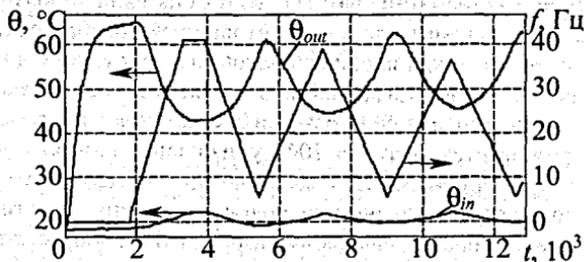


Рисунок 2 – Переходные процессы на объекте при пилообразном изменении частоты

Некоторые результаты обработки данных относительно среднего значения серий  $\mu$  отражены на рис. 3. Чтобы не утратить преимущество данного критерия для ПЛК длина серий  $N$  не задавалась выше 128. В отличие от математических экспериментов [5] в данном случае присутствует дополнительная настройка времени выборки данных  $t_i$ . Выбор  $t_i$  зависит от динамических свойств измерительных и регулируемых каналов. Для данного объекта оптимальным является значение в районе 8-12 с.

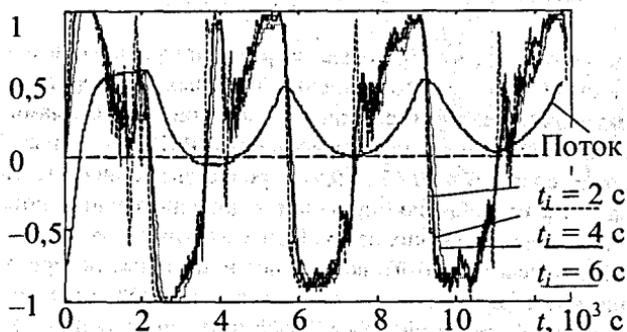


Рисунок 3 – Относительные изменения  $\theta_{отн}$  и  $\mu$  при длине серии  $N = 48$  и разном времени дискретизации  $t_i$

Фильтр скользящего среднего не позволил уверенно выявлять тренды ввиду несоизмеримости его длины со скоростями изменения измерительной информации. Формирование FIFO для данного фильтра в MatLAB со значительно большими интервалами позволило обеспечить устойчивую работу критерия серий.

В целом для задач выявления резких изменений трендов информационных потоков критерий серий проявил себя с наилучшей стороны. Высокое быстродействие ПЛК позволяет ограничиться невысокой длиной серий  $N$  для выявления критических явлений. Тщательная настройка  $N$  и  $t_i$  может позволить производить грубую оценку скорости, особенно, если оценивать  $\mu$  по нескольким  $N$ .

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Emerson Process Management [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/en-us/brands/deltav/advanced/pages/index.aspx>. – Дата доступа: 4.02.2013.
2. Журнал Control Engineering Россия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://controlengrussia.com/proekty-i-vnedrenija/metody-usovershenstvovannogo-upravlenija-processami>. – Дата доступа: 4.02.2013.
3. VIPA GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vipa.co.uk/products/system-200v/cpus>. – Дата доступа: 6.02.2013.
4. Олсон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олсон, Д. Пиани. – СПб: Невский диалект, 2001. – 557 с.
5. Сухорукова, И.Г. Эффективность работы адаптации фильтра на критерии серий / И.Г. Сухорукова, И.О. Оробей, Д.А. Гринюк // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. 2011. Вып. XIX. – С. 107-111.

## АНАЛОГОВЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАЦИЕЙ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

*Ярошевич А.В.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Традиционно считалось, что бытовые нагрузки потребляют в основном активную мощность (АМ). Распространение бытовых приборов с трансформаторами, электродвигателями и сложными электронными схемами привело к увеличению реактивной (индуктивной) мощности (РМ). По данным [1]  $\cos \varphi$  в таких цепях может составлять 0,65 ... 0,97. Средневзвешенное значение  $\cos \varphi = 0,85$ . Передача РМ к потребителю приводит к дополнительным потерям АМ в распределительных электрических сетях. При значении  $\cos \varphi = 0,85$  РМ составляет 60% от АМ. Вследствие этого возрастают и активные потери от передачи электроэнергии, которые при  $\cos \varphi = 0,85$  составляют 15% от полезной активной мощности у потребителя при 10% в случае чисто активной нагрузки.

Учитывая значительную долю бытового потребления электроэнергии, составляющую 20% от общего, задача разработки управляемого компенсатора реактивной мощности (КРМ) непромышленных нагрузок является актуальной. Промышленные устройства ступенчатого регулирования реактивной мощности построены с применением микропроцессорного контроллера и являются сложными и дорогими для массового использования в квартирных и других электрических сетях до 0,4 кВ с нагрузками до 50 кВт.

Исходя из этого, можно сформулировать основные требования к вычислителю КРМ для бытовых нагрузок. Для обеспечения экономической целесообразности применения решающим параметром должна быть стоимость устройства. Стоимость определяется построением электрических схем из простых и надёжных элементов, количество которых должно быть невелико. Такой подход позволит обеспечить другое важнейшее требование – небольшие габариты, позволяющие встраивать КРМ в квартирные щиты энергоснабжения.

Способ решения этой задачи и некоторые требования к устройствам предложены в [2] путём применения аналоговой схемы вычислителя для КРМ.

При реализации схемы компенсации РМ необходимо решить следующие проблемы:

- измерение величины реактивных потерь в реальном времени;
- определение ёмкости компенсирующего конденсатора;
- коммутация к сети ёмкости из конденсаторной батареи.

Общая схема предлагаемого устройства для компенсации РМ бытового потребителя электрической энергии представлена на рисунке.

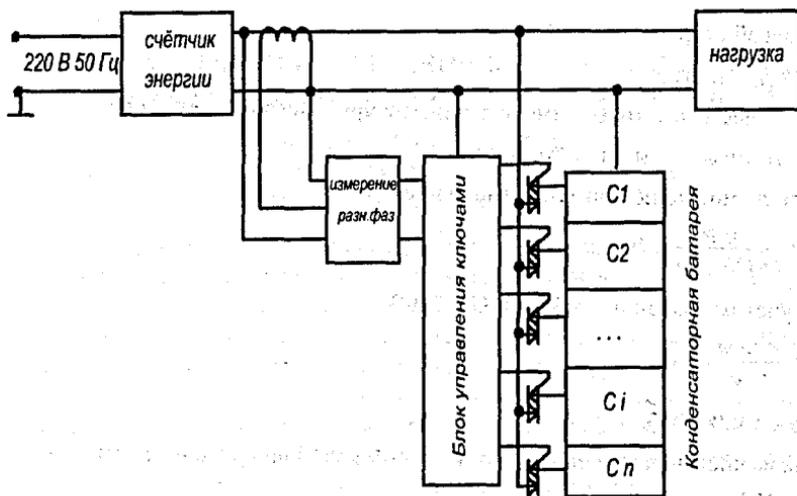


Схема компенсации РМ подключается между счётчиком электроэнергии и нагрузкой потребителя. Основными узлами схемы являются :

- схема измерения разности фаз сетевого напряжения и потребляемого тока, отражающей долю РМ в нагрузке;
- схема управления тиристорными ключами для коммутации компенсирующей ёмкости;
- линейка тиристорных ключей между конденсаторами батареи и фазным проводом;
- конденсаторная батарея конденсаторов.

Схему управления ключами предлагается реализовать на основе асимптотических формул для расчёта ёмкости компенсирующего конденсатора[3] .

Для обоснования предлагаемой асимптотической формулы получены следующие соотношения.

При средневзвешенном значении  $\cos \varphi = 0,85$  погрешность от представления  $\operatorname{tg} \varphi \approx \varphi$  (рад) не превысит 0,1 от значения  $\operatorname{tg} \varphi$ . Тогда соотношение активной и реактивной мощности  $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$  можно представить формулой  $Q/P \approx \varphi$ .

Погрешность от представления  $\cos \varphi \approx 1 - \varphi$  не превысит 0,12 значения  $\cos \varphi$ , тогда активную мощность можно представить формулой

$$P \approx UI(1-\varphi),$$

реактивную мощность

$$Q \approx UI(1-\varphi)\varphi.$$

Индуктивная мощность нагрузки, подлежащая компенсации

$$Q_L \approx UI_N(1-\varphi)\varphi,$$

где  $U$  – напряжение сети,  $I_N$  – ток в нагрузке.

С другой стороны, ёмкостная мощность

$$Q_C = I_C^2 / (2\pi f C),$$

где  $f$  – частота сети,  $C$  – ёмкость компенсирующего конденсатора,

$$I_C = I_H \sin \varphi \approx I_H \varphi \text{ – ток ёмкости.}$$

Отсюда можно получить соотношение

$$C \approx \frac{I_H \varphi}{2\pi f U (1 - \varphi)} (\Phi),$$

а с учётом значений  $f = 50$  Гц,  $U = 220$  В

$$C \approx \frac{k I_H \varphi}{1 - \varphi} (\Phi),$$

где  $k \approx 0,000015$ .

Для вычисления значения ёмкости в мкФ коэффициент  $k = 15$ , тогда

$$C \approx \frac{15 I_H \varphi}{1 - \varphi} (\text{мкФ}).$$

Допустив, что  $1 - \varphi \approx 1$ , получим  $C \approx 15 I_H \varphi$ .

Эта асимптотическая формула является основой для построения схемы управления ключами.

Для отображения величины и фазы потребляемого тока служит трансформатор тока на фазном проводе сети. Измерение разности фаз выполняется схемой на компараторах с транзисторными ключами. Эта схема имеет максимальную чувствительность и линейную прямо пропорциональную зависимость выходного напряжения от разности фаз входных сигналов. Перемножение аналоговых сигналов  $I_H$  и  $\varphi$  выполняется схемами с операционными усилителями. АЦП имеет выходной трехразрядный двоичный код  $a_0 a_1 a_2$ , позволяющий управлять семиступенчатым подключением конденсаторов батареи. Конденсаторная батарея может быть построена на специальных компенсирующих конденсаторах. Расчёт ёмкости батареи конденсаторов при токе нагрузки  $I_H = 25$  А и средневзвешенном значении  $\cos \varphi = 0,85$  даёт величину  $C \approx 200$  мкФ.

Анализ погрешностей, обусловленных асимптотическими приближениями и ступенчатым включением конденсаторных батарей, требует дальнейших исследований.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шишкин, С.А. Реактивная мощность потребителей и сетевые потери электроэнергии // Энергосбережение. – 2004. – № 4.
2. Ярошевич, А.В. Схема компенсации реактивной мощности в квартирных электрических сетях // Вестник Брестского государственного технического университета. – Вып.5(71): физика, математика, информатика. – Брест: БрГТУ, 2011. – С. 66-67.
3. Регулятор реактивной мощности с аналоговым вычислителем: пат. 8066 Республика Беларусь / А.В. Ярошевич // Афіцыйны бюл. / Дзяржаўны рэстр карысных мадэляў. – 2011.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БОРТОВЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Достовалова С.С., Заика С.В.*

Самарский государственный аэрокосмический университет,  
Самара, Российская Федерация

На борту современных летательных аппаратов используется большое количество оптико-электронных систем и устройств. Лазерные дальномеры, прицелы, системы наведения, гироскопы – вот далеко не полный перечень устройств, основным элементом которых является оптико-электронный прибор. Для эффективной работы им требуются определенные температурные режимы.

Существует множество систем охлаждения разной степени совершенства, которые удовлетворяют тем или иным техническим требованиям. Основными параметрами, которыми отличаются аэрокосмические системы охлаждения от промышленных или систем наземного применения, являются:

- минимально возможная масса;
- минимально возможная потребляемая мощность,
- высокая надёжность, исключающая необходимость ремонта.

Степень совершенства бортовых систем охлаждения в значительной мере определяет возможности аэрокосмической техники, потому что подобные системы нередко применяют на летательных аппаратах с крайне ограниченными техническими характеристиками: энергетическими ресурсами, лимитированием по массе и габаритным размерам.

Криоэлектронные приборы можно классифицировать по следующим признакам:

- по температуре криостатирования – на приборы с гелиевым (до 15 К), неонов-водородным (до 70К) и азотным (свыше 70 К) уровнями охлаждения;
- по величине тепловой нагрузки – приборы с малым внутренним тепловыделением и незначительной массой охлаждаемых элементов (ИК-приёмники), со значительным тепловыделением, но малой теплоёмкостью элементов (полупроводниковые квантовые генераторы – ПКГ) и, наконец, с относительно большой массой и теплоёмкостью охлаждаемых элементов, но малыми внутренними тепловыделениями (СВЧ – приборы).

ИК-приёмники – глубоко охлаждаемые приёмники инфракрасного излучения, являются одним из основных элементов оптико-электронных систем. Высокая эффективность работы ИК-приёмников обеспечивается охлаждением до температуры 77К и ниже.

Обеспечение охлаждения до криогенных уровней температуры ИК – приёмников, элементов оптических систем и других устройств, устанавливаемых на летательных аппаратах, – важнейшее требование, предъявляемое ко многим авиационным и космическим проектам.

Существенная особенность фотоприёмников – незначительные тепловыделения  $Q_{\text{в}}$  в чувствительном элементе. Требования к стабильности температуры криостатирования для большей части приборов этого типа достаточно просты

(за исключением сверхпроводниковых болометров, а также фотоприёмников, в которых регламентируется уровень низкочастотных шумов).

Весьма близки к фотоприёмникам по конструкции полупроводниковые лазеры и светодиоды. Главное отличие их с криотехнической точки зрения состоит в том, что на активном элементе лазера, установленном обычно в той же зоне прибора, что и фоточувствительный элемент приёмника, выделяется значительная тепловая мощность до 10–20 Вт на один канал. Эта особенность полупроводникового лазера требует тщательной оценки условий теплообмена в зоне активного элемента и ограничивает выбор возможных вариантов систем охлаждения.

Криозлектронные СВЧ – устройства в конструктивном отношении представляют собой самостоятельную категорию низкотемпературных приборов, отличающихся в первую очередь относительно большими значениями теплопритоков  $Q_T^*$  и  $C_{пр}$ ; это связано со значительными размерами криостатов, в которых размещены охлаждаемые СВЧ–блоки, заметными теплопритоками по волноводам и другим устройствам для ввода СВЧ–сигнала, а также существенно большей, чем в ИК–приёмниках и полупроводниковых лазерах, массой охлаждаемых узлов.

Во многих случаях конструкция приборов этого типа не позволяет установить микрокриогенную установку в непосредственной близости от охлаждаемого объекта и осуществить локальное охлаждение активного элемента (например, диода в параметрическом усилителе), что вызывает дополнительные потери холода.

Для захлаживания бортовых систем охлаждения могут быть использованы следующие способы и охладители:

- забортный воздух с температурой до  $-40^{\circ}\text{C}$  и ниже (для авиационных систем);
- использование теплоты фазового перехода, запасённого на борту жидкого или твёрдого криоагента;
- термомеханические охладители, работающие по обратному циклу (парокомпрессионные холодильные машины, ГKM Стирлинга, Такониса, пульсационные охладители);
- дроссельные системы охлаждения, работающие от газа высокого давления, запасённого в баллонах;
- вихревая система охлаждения, с делящей или самовакуумирующейся вихревой трубой, работающая на воздухе с давлением до 0,6 МПа, поступающего от двигателя самолёта;
- термоэлектрические системы охлаждения, основанные на эффекте Пельтье.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ приведённых способов охлаждения.

На основании проведённого анализа современных систем охлаждения аэрокосмического назначения следует, что энергопотребление, масса, габаритные размеры и длительность работы являются важнейшими их техническими характеристиками.

Кроме того, можно сделать следующие выводы:

- наиболее приемлемыми для уровней термостатирования 80 К являются ГKM Стирлинга, дроссельные системы охлаждения на сжатых газах и испарительные системы охлаждения на жидких криоагентах;

Таблица 1

№	Способы захлаживания	Преимущества	Недостатки
1	Забортный воздух	Простота	Зависимость от высоты и скорости самолёта
2	Жидкий криоагент	Простота системы; высокий потенциал холодопроизводительности	Невозможность длительного наземного хранения. Необходимость запаса на борту количества криоагента, соответствующего времени работы комплекса. Сложность подачи рабочего тела при эволюциях и перегрузках
3	ГКМ Стирлинга	Возможность получения температуры охлаждения в широком диапазоне до 80К. Возможность использования для ИК-систем	Сложность ГКМ. Относительно небольшой ресурс. Высокая стоимость
4	Дроссельные системы охлаждения	Простота. Наличие серийных систем. Универсальность применения для бортовых систем	Существенная масса баллонов. Изменение температуры дросселирования
5	Вихревой эффект	Простота конструкции. Регулирование. Малая масса	Давление воздуха 6 атм., ограничение по температуре охлаждения
6	ТЭО	Простота в эксплуатации	Низкая эффективность. Организация теплосъёма с горячих спаев

- для космических систем охлаждения с длительным ресурсом работы используются газовые криогенные машины;
- для бортовых авиационных систем используются все три типа системы охлаждения, включая испарительные;
- дроссельные системы охлаждения разомкнутого типа имеют минимально возможное энергопотребление и максимальную надёжность;
- дроссельные баллонные системы охлаждения достигли предела своего совершенства;
- основным элементом, определяющим габариты системы охлаждения в баллонной дроссельной системе, а также и в испарительной системе, является ёмкость для хранения рабочего тела;
- в поле характеристик системы охлаждения между дроссельными баллонными системами и испарительными существует область, предполагающая совмещение преимуществ испарительных и дроссельных баллонных систем охлаждения;
- создание баллонной дроссельной системы охлаждения, работающей на рабочем теле с околоскритическими параметрами, позволит получить систему с улучшенными режимно-параметрическими и эксплуатационными показателями.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Довгялло, А.И. Аэрокосмические бортовые криогенные системы охлаждения / А.И. Довгялло, С.О. Некрасова, Д.В. Сармин, А.А. Шиманов, А.Б. Цапкова, Д.А. Угланов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2013.
2. Архаров, А.М. Криогенные системы: основы теории и расчёта [Текст] / А.М. Архаров. – М.: Машиностроение, 1988. – 464 с.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ В РЕГАЗИФИКАТОРАХ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

*Новиков А.В., Угланов Д.А.*

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)  
Самара, Российская Федерация

Сжиженный природный газ (СПГ) предлагается использовать в различных системах аэрокосмической техники. В настоящее время он применяется в энергетических комплексах различного назначения, на транспорте и в газоснабжении населённых пунктов и отдельных предприятий. На одном из этапов его использования производится его регазификация – перевод из жидкого состояния в газообразное за счёт подвода внешнего тепла. В настоящее время газификация СПГ в основном происходит за счёт тепла окружающей среды. При этом считается, что использование тепла окружающей среды не является энергозатратным процессом. Однако стоит учитывать, что для ожижения СПГ ранее была затрачена значительная энергия (около 0,4-0,5 кВт\*ч электроэнергии на 1кг СПГ [1]), которая при данном способе газификации просто сбрасывается в окружающую среду. Таким образом, сжиженный природный газ содержит в себе энергетический потенциал, который можно было бы использовать при его возвращении в исходное газообразное состояние, и, следовательно, сам процесс регазификации СПГ обладает значительным потенциалом для энергосбережения.

Одним из способов использования этого потенциала является применение термоэлектрических генераторов для выработки электроэнергии за счёт разности температур между СПГ и окружающей средой.

В данной работе дается оценка располагаемого «отрицательного» тепла СПГ при использовании термоэлектрических генераторов.

Важнейшими характеристиками термоэлектрических генераторов являются коэффициент преобразования энергии (КПД)  $\eta$  и мощность  $P$ , [2]:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{m} + \frac{1}{Z \cdot T_2} \cdot \frac{(m+1)^2}{m} - \frac{1}{2} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_2} \cdot \frac{1}{m}}$$

$$P = I \cdot U = \frac{\alpha^2 \cdot (T_2 - T_1)^2}{R} \cdot \frac{m}{(m+1)^2}$$

где  $T_2$  – температура на горячей стороне модуля;  $T_1$  – температура на холодной стороне модуля;  $m = \frac{R_x}{R}$  – отношение сопротивления нагрузки к внутреннему

сопротивлению генератора;  $Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda}$  – термоэлектрическая эффективность (добротность) материала модуля [2];  $\alpha$  – коэффициент Зеебека;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $\sigma$  – электропроводность материала;  $I$ ,  $U$  – сила и напряжение в модуле соответственно.

В работе [5] в результате расчёта модулей из перспективных материалов при температурах от 130 К до 290 К был получен КПД  $\eta = 9 \dots 9,6\%$ , что является вполне приемлемым показателем при данной разнице температур.

Таким образом, уже в настоящее время возможность эффективного применения термоэлектрических генераторов на низких температурных уровнях определяется не свойствами полупроводниковых материалов, а экономической целесообразностью и технологическими возможностями.

В данной работе для расчёта была выбрана схема, наиболее часто встречающаяся в промышленных установках: сжиженный природный газ подаётся под давлением  $P=0,3671$  МПа из резервуара с температурой  $T_1=130\text{K}$ [6]. На первом участке рис. 4 он подогревается до температуры кипения, равной  $T_2=150\text{K}$ . На участке 2 происходит газификация (кипение) жидкого метана при постоянных температуре и давлении. После того, как весь метан перешёл в газообразную фазу, происходит его изобарный подогрев до  $T_3=285\text{K}$ , которая определяется по температуре окружающей среды (300К) с учётом недорекупации в 15 градусов.

Теплоёмкость метана на каждом участке принималась постоянной и рассчитывалась по средней температуре участка.

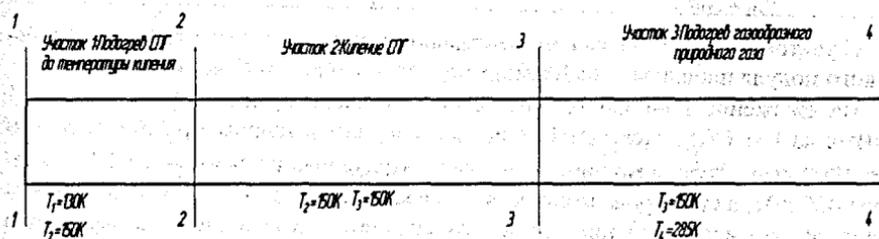
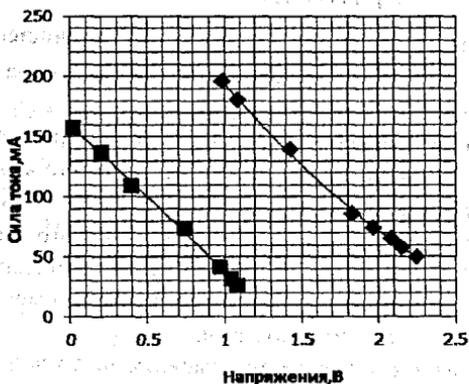


Рисунок 2 – Схема испарителя

В процессе работы использована теория теплопередачи цилиндрической тонкой стенки с односторонним оребрением.

Далее производился теоретический и экспериментальный расчет основных параметров ТЭГ, где оценивалась потенциальная мощность на участках. Определялась сила тока, вырабатываемая одним модулем на участках испарителя.

В результате теоретического расчета и экспериментальной проверки получены значения параметров для каждого участка испарителя, например, мощность, рассчитанная теоретическим и полученная экспериментальным путем, а также количество ТЭГ, необходимых для получения напряжения в 220В, представлены в табл.2. Вольтамперная характеристика подогрева жидкого азота до температуры кипения с обдувом ТЭГ показана на рис. 2.



- ◆ Вольтамперная характеристика на участке подогрева жидкого азота до температуры кипения с обдувом ТЭГ
- Вольтамперная характеристика на участке подогрева жидкого азота до температуры кипения без обдува ТЭГ

Рисунок 2 – Сравнение полученных результатов

Таблица 1 – Результаты теоретического расчета и экспериментальной проверки

Параметр	Участок		
	1	2	3
$P_{расч}, ШТ$	1305	1162	2116
$P_{эксп}, ШТ$	262	253	248
$P_{расч\ модуля}, Вт$	0,0115	0,0118	0,003
$P_{расч\ блока}, Вт$	15	13,7	6,3
$P_{эксп\ модуля}, Вт$	0,29	0,27	0,25
$P_{эксп\ блока}, Вт$	76	68,3	61,75

С учётом полученной экспериментальной мощности одного термоэлектрического модуля площадью 30х30мм потребуется около 18000 модулей.

На ожижение природного газа затрачена значительная энергия – около 1 кВт·ч на 1 кг СПГ. Расход СПГ в испарителе, рассчитанном в работе, составляет 1000 кг/ч. Отсюда мощность энергии, затраченная на сжижение СПГ, составит 400 кВт, а суммарная мощность, вырабатываемая ТЭГ, – около 4,8 кВт. Отсюда за счет использования ТЭГ в промышленных газификаторах возвращается около 1,2% энергии, затраченной ранее на сжижение природного газа.

Таким образом, проведённое предварительное исследование показало перспективность использования термоэлектрических генераторов для утилизации низкопотенциального тепла в регазификаторах энергетических комплексов, работающих на сжиженном природном газе.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Промышленные газификационные системы СПГ «ОАО Криогенмаш». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cryogenmash.ru/production/gaz.php>
2. Duck-Young Chung, Tim Hogan et al.  $CsBi_4Te_6$ : A High-Performance Thermoelectric Material for Low-Temperature Applications. Science, 2000. – Vol. 287. – P. 1024-1027.
3. Загорученко, В.А. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана [Текст] / В.А. Загорученко [и др.]. – М.: издательство комитета стандартов, 1969. УДК 621.57

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КОМПЛЕКСАХ НА СПГ

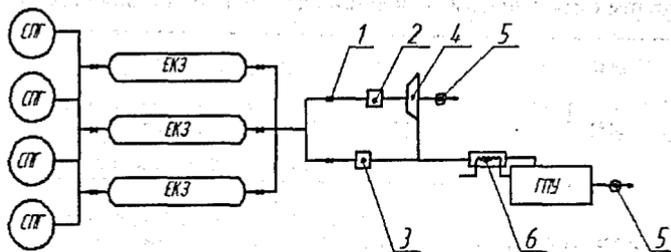
Крюкова Д.Е.<sup>1</sup>, Благин Е.В.<sup>2</sup>, Угланов Д.А.<sup>2</sup>

1) РКЦ «Прогресс», Самара, Российская Федерация;

2) Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева (Научно-исследовательский университет), Самара, Российская Федерация

В настоящее время природный газ в энергетике используется в сжиженном состоянии (СПГ). Для накопления, хранения и выдачи криогенной жидкости в составе заправочных систем используют криогенные резервуары. Правильный подбор резервуара будет определять долговечность, надежность и экономичность всей системы. Основным преимуществом использования газов в криогенно-сжиженном состоянии является удобство их хранения, а также транспортировки и потребления [1].

В данной работе предлагается использовать установку по регазификации сжиженного природного газа в емкости с криогенной заправкой [2], в результате чего получается газ высокого давления и температурой окружающей среды, которая предназначена для приведения в действие газопоршневой установки. Так как давление внутри емкости существенно выше необходимого давления топлива на входе в газопоршневую установку, то присутствует возможность установки каскада турбин, которые позволяют получать дополнительную энергию получать дополнительную работу.



1 – задвижка; 2 – редуктор; 3 – редуктор на 0,1 МПа;  
4 – комплекс турбин; 5 – эл. генератор; 6 – теплообменник

Рисунок 1 – Комплекс СПГ на основе ЕКЗ  
с возможностью утилизации низкотемпературной энергии

Принцип работы данной установки состоит в следующем. В емкость ЕКЗ заправляется сжиженный природный газ при температуре 112 К. Далее он газифицируется за счет естественных теплопритоков до температуры окружающей среды 300 К и давления 30 МПа. После чего, при определенной температуре и давлении, газ поступает в магистраль с комплексом расширительных турбин, на которых вырабатывается электрическая энергия. Далее газ сжигается в газопоршневой установке (ГПУ).

Для оценки использования дополнительной энергии удобно применять безразмерный показатель – коэффициент использования, который будет представлять собой отношение дополнительной энергии, полученной с турбины, к максимально возможной:

$$k_{\text{исп}} = \frac{L_{\text{конт}}}{L_{\text{max}}} \quad (1)$$

где максимально возможная работа будет определяться следующим образом:

$$L_T = G \cdot \tau \cdot c_{pT} T_r^* \left( 1 - \frac{1}{\pi_T^{k_T} k_T} \right) \eta_T^*$$

где  $c_{pT}$  – средняя изобарная теплоёмкость газа на входе в турбину, Дж/(кг·К);

$T_r^*$  – температура газа в емкости, °К;

$\pi_T^*$  – степень понижения давления в турбине;

$k_T$  – показатель изэнтропии для газа;

$\eta_T^*$  – коэффициент полезного действия турбины.

$G$  – расход газа, поступающего из емкости (0,06 кг/с);

$\tau$  – время работы турбины (определяется как время от начала истечения до времени, когда давление газа в емкости достигнет величины, до которой редуцируется давление перед турбиной).

Соответственно, чем больше  $\pi_T^*$ , тем больше удельная работа, совершаемая турбиной, но тем меньше время её работы, и наоборот. Можно предположить наличие максимального значения выработанной дополнительной энергии с соответствующим оптимальным значением оптимальной степени расширения  $\pi_T^*$ .

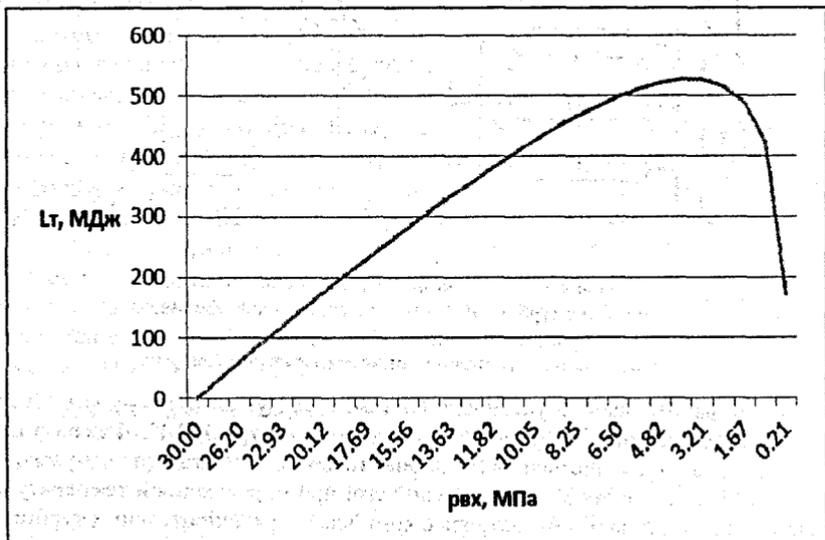


Рисунок 4 – Изменение работы от давления

Итак, для определения величины дополнительной энергии, которая может быть получена во время регазификации сжиженного природного газа за счет использования нескольких контуров турбин, необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$L_{\text{конт}} = G \cdot \left[ L_{T1} \cdot \tau_1 + \sum_{i=2}^n L_{Ti} \cdot (\tau_i - \tau_{i-1}) \right],$$

где  $n$  – число контуров;

$\tau_i$  – время, за которое давление в емкости упадет до давления газового редуктора перед  $i$ -м контуром;

$L_{Ti}$  – удельная работа каскада турбин в  $i$ -м контуре.

Расчет был проведен для установок с числом контуров от 1 до 5 (табл. 1) с поиском оптимальных значений степени расширения для каждого контура.

Использование большего количества контуров нецелесообразно, так как суммарная степень расширения  $\pi_{\Sigma}=300$  может быть реализована за счет каскада из 4-5 турбин, а дальнейшее увеличение их количества не окупает появляющийся прирост энергии.

Таблица 1 – Результаты расчета дополнительной энергии для различного числа контуров

Число контуров	Дополнительная энергия, МДж	Коэффициент использования
1	249	0,64
2	303,5	0,78
3	328,9	0,84
4	342,9	0,88
5	350,4	0,90

На основании выполненного расчёта можно сделать вывод, что оптимальной будет установка с пятью контурами, которая позволит при расходе газа 0,06 кг/с получить 350,4 МДж энергии за 7 часов работы.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бармин, И.В. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра [Текст] / И.В. Бармин, И.Д. Кунис; под ред. А.М. Архарова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 256 с.
2. Топливный баллон [Текст]: пат. 2163690 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>F17C9/02, F17T10/06 / А.И. Довгялло, С.В. Лукачев [и др.]; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет. – № 99114577/06; заявл. 02.07.1977; опубл. 27.02.2001 // Бюл. №6. – 6 с.

# **НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАШИН. ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

## ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПО СОЗДАНИЮ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Рудь В.Д., Самчук Л.М., Гулиева Н.М., Зубовецька Н.Т.*

Луцкий национальный технический университет,  
Луцк, Украина

Национальная инновационная система, которая ещё только создается в Украине, должна учитывать, что 10-15% инновационной продукции составляют разработки общегосударственного значения. Такую нишу в нашей стране прежде всего занимают проекты ресурсосберегающих технологий. Инновационное развитие ресурсосберегающих технологий является своеобразным катализатором, способствующим образованию наукоёмкого сектора промышленности и формированию основ научно-технического прогресса. Для стран переходного типа развитие ресурсосберегающих технологий становится основой инновационных механизмов, которые объединяют в единый поток генерирование научных идей и прикладных разработок.

В Украине в настоящее время не преодолен разрыв между прогрессирующим накоплением отходов и мероприятиями по их утилизации, обезвреживанию, что может способствовать углублению экологического кризиса. Эффективное решение экологических проблем, связанных с ликвидацией или ограничением негативного воздействия твердых отходов на окружающую среду и здоровье людей, реализуется с помощью действующих законов Украины. Основная масса твердых промышленных отходов образуется на предприятиях горной промышленности (шлаки, отвалы и др.); черной и цветной металлургии (шламы, отходы металла, колошниковая пыль и др.); металлообрабатывающей промышленности (металлическая стружка, бракованные изделия, лом и др.); лесной и деревообрабатывающей промышленности (лесозаготовительные отходы, отходы древесины при изготовлении мебели, паркета, дверей, окон и других деревянных изделий, отходы клеев, формальдегидных смол, лакокрасочных материалов и др.); энергетики (шлаки, зола, образующиеся на тепловых электростанциях и др.); химической и смежных отраслей промышленности (фосфогипс, галит, огарок, шлаки, стекло, цементная пыль, резина, пластмассы и др.). Проблемы с накоплением и утилизацией промышленных отходов возникают и требуют своего решения в каждой цивилизованной стране. Не является исключением и Украина. Основными принципами государственной политики Украины в сфере решения проблем отходов на современном этапе является приоритетная защита окружающей природной среды и здоровья человека от их негативного влияния, обеспечения экономного использования материально-сырьевых и энергетических ресурсов, научно обоснованное согласование экологических, экономических, социальных интересов по образованию и использованию отходов. Основные направления решения проблемы отходов на совре-

менном этапе следующие: разработка и утверждение общегосударственной программы по решению проблем твердых отходов; введение малоотходных и безотходных технологических процессов в переработке отходов; обеспечение своевременного сбора и обезвреживания отходов; соблюдение правил экологической безопасности при их размещении, переработке и обезвреживании; уменьшение токсичности твердых отходов в производственных процессах; обеспечение комплексного использования отходов [1].

Ученые всех стран работают над созданием ресурсосберегающих экологически чистых технологий. В Украине также есть разработки в данной области. Одна из таких технологий, разработанная в Луцком национальном техническом университете, позволяет стружечные и шламовые отходы металлообработки превратить в необходимый для производства материал. Посвящены данной проблеме труды В.Д. Рудя, Т.Н. Гальчук, А.Ю. Войлочного. Результаты проведенных исследований являются основой для оптимизации технологии изготовления фильтровальных пористых проницаемых материалов с использованием порошков стали ШХ15 (рис. 1) [2]. Данные исследования подтверждены внедрениями конкретных результатов работы на ряде предприятий: на ПАО "Электротермометрия" (г. Луцк, Украина) на основе Самораспространенного высокотемпературного синтеза предложена и внедрена ресурсосберегающая технология изготовления штуцеров счетчика расхода воды КВ-1,5 (ТУ У 3.48.-00225644-017-94), для ОАО "СКФ – Украина" изготовлена контрольная партия фильтров на основе Ti-C-ШХ15 с целью регенерации промышленных жидкостей [3]. Основные результаты работы, методики исследований использованы в учебных курсах Луцкого НТУ: "Технологические основы получения заготовок"; "Малоотходные технологии".

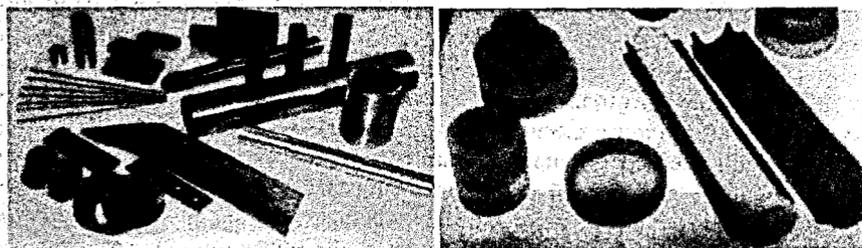


Рисунок 1 – Изделия, изготовленные с использованием отходов подшипникового производства

На основе исследований разработана последовательность операций технологического процесса получения материала (рис. 2) в виде металлического порошка стали ШХ15 из шлифовального шлама подшипникового производства. Установлены оптимальные режимы переработки шламов, обеспечивающие эффективную очистку, измельчение и восстановление металлического порошка.



Рисунок 2 – Технологическая схема метода СВС – процесса

Технологический процесс характеризуется следующими основными параметрами:

1) включает ограниченное количество (чаще всего – не более трех) основных операций при незначительном объеме подготовительных и вспомогательных операций;

2) обеспечивает наиболее полный переход исходных материалов в целевой продукт (безотходность), при небольшой потребности во вспомогательных материалах;

3) отличается глубоким переделом исходных материалов в ходе основных операций, при которых происходят радикальные изменения структуры и свойств материала, нередко с изменением его агрегатного состояния;

4) позволяет получать в ходе основных операций целевой продукт (изделие), в максимальной степени пригодный к эксплуатации или требующий незначительной конечной обработки;

5) предусматривает доминирование энергетических затрат на проведение базовой операции (операций) в общем балансе энергопотребления.

Процесс получения фильтров состоит из трех последовательных стадий: приготовление экзотермической смеси, формирование и синтез изделий с необходимой геометрией.

Проведенные исследования показали, что полученный порошок стали ШХ15 имеет высокую чистоту, и на его основе можно создавать порошковые композиционные материалы различного машиностроительного назначения.

Итак, инновационное развитие ресурсосберегающих технологий становится основой региональной и национальной политики, поскольку в процессе их функционирования разрабатываются и обосновываются предложения о приоритетах развития государства на всех уровнях.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Рудь, В.Д. Дослідження процесів подрібнення металевих порошків / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук // Наукові нотатки. – 2009. – Вип. 25. – С. 306-310.
2. Рудь, В.Д. Использование отходов подшипникового производства в порошковой металлургии / В.Д. Рудь, Т.Н. Гальчук, О.Ю. Повстяной // Порошковая металлургия. – 2005. – № 1/2. – С. 106-112.
3. Рудь, В.Д. Вплив технології синтезу на структуру та властивості спеченого композиту системи Ti-Fe-C / В.Д. Рудь, Л.М. Самчук // Вісник НТУ України "КПІ". Серія машинобудування. – № 64. – С. 239-244.

УДК 517.444:534.232

### **ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ СИГНАЛОВ В ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ЗУБЧАТЫХ ПРИВОДОВ**

*Омель Д.В., Драган А.В.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Виброакустические колебания, возбуждаемые зубчатыми парами, отличаются высокими частотами, малыми амплитудами смещения и значительными ускорениями. Виброакустический сигнал имеет сложную структуру, содержит полезную составляющую и помеху, которая препятствует точной расшифровке информации, содержащейся в сигнале. Так, исходным сигналом является короткий импульс, вырабатываемый в зубчатой паре при соударении, между тем, датчик воспринимает не этот сигнал, а затухающее колебание. Поэтому при разработке системы диагностики стоит выбирать такой способ обработки сигнала, при котором влияние помех минимизируется [1].

Спектральный анализ – один из наиболее распространенных классических методов обработки виброакустических сигналов, который позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала, однако не дает представления о локальных свойствах сигнала при быстрых временных изменениях его спектрального состава, так как лишен возможности получения информации о том, какие частоты присутствуют в сигнале в данный момент времени. Эти серьезные ограничения преодолеваются за счет специального аппарата представления произвольных сигналов на основе нового математического базиса – вейвлетов [2].

Дискретное и непрерывное вейвлет-преобразование нашло широкое применение в обработке виброакустических сигналов. В частности, вейвлет-анализ дает уникальные возможности распознавать локальные и «тонкие» особенности сигнала. Выбор конкретного вейвлета целиком зависит от характера поставленной задачи и от конкретного анализируемого сигнала. Получаемая в результате

преобразования сигнала вейвлет-спектрограмма открывает новые возможности в интерпретации локальных особенностей сигнала [3]. Однако не следует пренебрегать классическими методами спектрального анализа сигналов, которые дают обобщенную картину виброактивности исследуемой системы и позволяют локализовать дефект.

Ниже приведены результаты вейвлет-анализа виброакустического сигнала, измеренного при работе коробки скоростей универсального токарного станка СН-401/501. Предварительно измерялась виброактивность исправного привода. Затем на один из валов устанавливалось зубчатое колесо с частичным сколом одного зуба (величина скола составляла 25, 50, 75%), и повторялись измерения. В среде MATLAB выполнялось непрерывное и дискретное вейвлет-преобразование измеренного вибросигнала. Преобразование производилось с помощью вейвлета Морле.

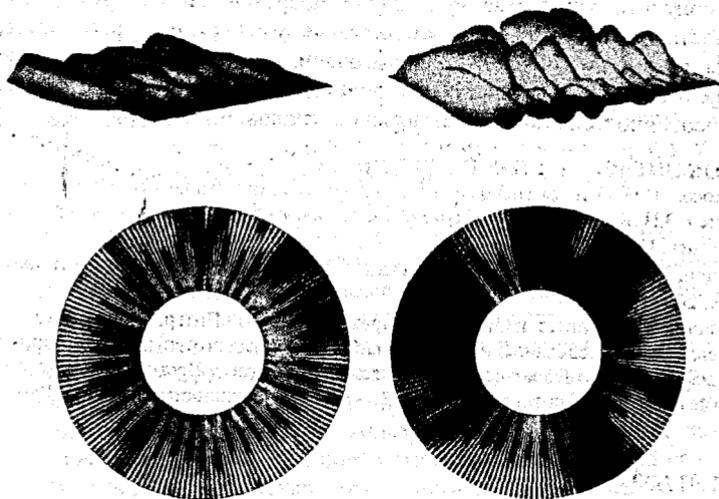


Рисунок 1 – трёхмерные и круговые графики вейвлет-коэффициентов: слева – исправный привод; справа – привод с поврежденным колесом (скол зуба)

На рис.1 показаны графики полученных вейвлет-коэффициентов. Можно отметить, что равномерность вейвлет-спектрограммы при исправном зубчатом колесе сменилась неравномерностью при появлении скола одного зуба. Также значительно возросли вейвлетные коэффициенты практически для всех временных масштабов, что подтверждает теорию удара, согласно которой, ударный импульс формирует широкополосные затухающие колебания.

Для количественной оценки изменений вибросигнала использовались статистические характеристики детализирующих вейвлет-коэффициентов, полученных при дискретном преобразовании синхронного сигнала (табл.1), которые обладают диагностической значимостью при выявлении повреждений зубчатых колес.

Таблица 1 – Стандартные отклонения детализирующих вейвлет-коэффициентов

Степень повреждения, %	Среднеквадратичное отклонение	
00	2,43	
25	7,67	
50	7,51	
75	8,11	

Среднеквадратичное отклонение моментально «реагирует» на зарождение дефекта, так как происходит перераспределение вибрационной энергии на спектре, а также позволяет локализовать дефект. Полученный результат по характеру изменения диагностического признака сопоставим с ранее проводимыми исследованиями глубины модуляции вибросигнала [4].

Проведенные исследования доказывают информативность вейвлет-коэффициентов при диагностике эксплуатационных дефектов зубчатых передач, позволяют получить количественную оценку повреждения и снизить субъективность в постановке диагноза. Современные системы компьютерной математики снабжены функциями вейвлет-преобразования и содержат большой аппарат вейвлетов, а также позволяют проектировать собственные вейвлеты для исследования особенностей виброакустических сигналов.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Костоков, В.Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования: учебное пособие / В.Н. Костоков, А.П. Науменко, С.Н. Бойченко, Е.В. Тарасов; под ред. В.Н. Костокова. – Омск: НПЦ «Динамика», 2007. – 286 с.
2. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
3. Дьяконов, В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – СПб.: Питер, 2008. – 440 с.
4. Омесь, Д.В. Исследование модуляции виброакустического сигнала при зарождении и развитии дефекта зубчатого колеса / Д.В. Омесь, А.В. Драган // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2013. – №4(82): Машиностроение. – С. 39-43.

УДК 621.91.002

### ОБОСНОВАНИЕ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЗАМЫКАЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ СБОРОЧНЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ КОМПЕНСАТОРАМИ – ЧЛЕНАМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РЯДА

*Медведев О.А.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Метод регулирования широко используется для достижения высокой точности замыкающих звеньев длинных конструкторских сборочных размерных цепей машин в серийном и массовом производстве. Однако его применение при неточных составляющих звеньях и точном замыкающем звене приводит к большим затратам на изготовление большого числа компенсаторов. Известен способ уменьшения требуемого количества компенсаторов в комплекте на одно

изделие путем подчинения их размеров геометрической прогрессии со знаменателем 2 [1]:  $Ki = C, 2C, 4C, 8C, 16C, 32C \dots$ . Применение такого ряда обусловлено тем, что при выборочном сложении размеров компенсаторов можно получить суммарный размер любой кратности по отношению к ступени компенсации  $C$ . Однако в технической литературе отсутствуют методики расчета рациональной величины  $C$  и минимально достаточного числа компенсаторов  $n$  в комплекте на одно изделие с учетом погрешностей сборочных работ и оснастки (эталонów, измерительных средств, компенсаторов и т.п.).

Основой предлагаемой методики определения допустимых погрешностей сборочной оснастки являются схемы компенсации суммарного допуска составляющих звеньев конструкторской сборочной размерной цепи, представляющие собой сочетание конструкторской и технологической сборочных размерных цепей. Конструкторская цепь реальной машины представляется в схеме компенсации математически тождественной трехзвенной цепью, состоящей из суммарного составляющего звена  $A_{\Sigma}$ , компенсатора  $K$  и замыкающего звена  $A_{\Delta}$ . Суммарное составляющее звено является алгебраической суммой всех реальных составляющих звеньев (кроме компенсатора), а его допуск  $TA_{\Sigma}$  равен арифметической сумме допусков составляющих звеньев (кроме компенсатора). При этом все многообразие реальных конструкторских цепей может быть сведено к двум вариантам трехзвенных цепей (с уменьшающим или увеличивающим компенсатором). В схеме компенсации каждое звено трехзвенной цепи представлено его предельными размерами и полем допуска.

Технологическая сборочная размерная цепь формируется на этапе предварительной сборки изделия (без компенсатора и с эталоном на месте замыкающего звена), когда измеряется требуемый размер компенсатора. Замыкающим звеном в ней является местоположение компенсатора, а составляющими звеньями, кроме размеров деталей изделия, также являются размеры используемой сборочной оснастки и погрешности выполнения сборочных работ. При окончательной сборке изделия из комплектующих деталей и выбранного компенсатора, отклонение замыкающего звена конструкторской цепи от эталона будет равно отклонению размера выбранного компенсатора от размера его местоположения. Это отклонение складывается из отклонений тех звеньев технологической цепи, которые при предварительной сборке конкретного изделия могут приобретать случайные значения, отличающиеся от их значений в конструкторской цепи (погрешность изготовления эталона среднего значения замыкающего звена  $\varepsilon_{\Sigma}$ , погрешность установки эталона  $\varepsilon_{\Sigma 2}$ , погрешность измерения местоположения компенсатора  $\varepsilon_{\Delta}$ , погрешность изготовления компенсаторов  $TK$ , погрешность выбора компенсатора  $\varepsilon_{\kappa}$ ). Погрешности таких звеньев могут быть компенсированы только за счет допуска замыкающего звена конструкторской цепи, а не выбором компенсатора. Технологическая цепь представлена в схеме компенсации указанными погрешностями, которые в сумме не должны превышать допуска замыкающего звена конструкторской цепи  $TA_{\Delta}$ . При допущении о симметричном распределении суммарной погрешности, совмещаем середине ее поля рассеяния с серединой поля допуска замыкающего звена конструкторской цепи. На схемах сумма  $\varepsilon_{\Sigma}, \varepsilon_{\Sigma 2}, \varepsilon_{\Delta}$  обозначена как погрешность формирования размера компенсатора  $\varepsilon_{PK}$ .

Для уменьшения требуемого числа компенсаторов целесообразно обеспечить частичное перекрытие  $TA_{\Delta}$  и  $TA_{\Sigma}$ . Это всегда можно сделать путем корректировки положения поля допуска любого из составляющих звеньев конструкторской цепи. При этом число компенсаторов в комплекте на одно изделие будет на единицу меньше числа ступеней компенсации. Для того чтобы набор компенсаторов при любом их числе оставался уменьшающим или увеличивающим, надо середину  $TA_{\Delta}$  совместить с серединой первой ступени компенсации. Схемы компенсации, учитывающие эти особенности, приведены на рис.1 и 2, для уменьшающего и увеличивающего компенсатора, соответственно.

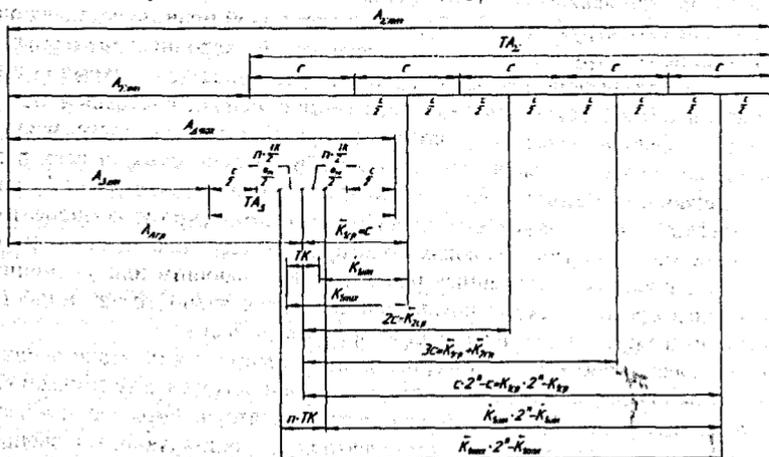


Рисунок 1 – Схема компенсации допусков составляющих звеньев регулированием комплектом неподвижных тонких уменьшающих компенсаторов - членов геометрического ряда

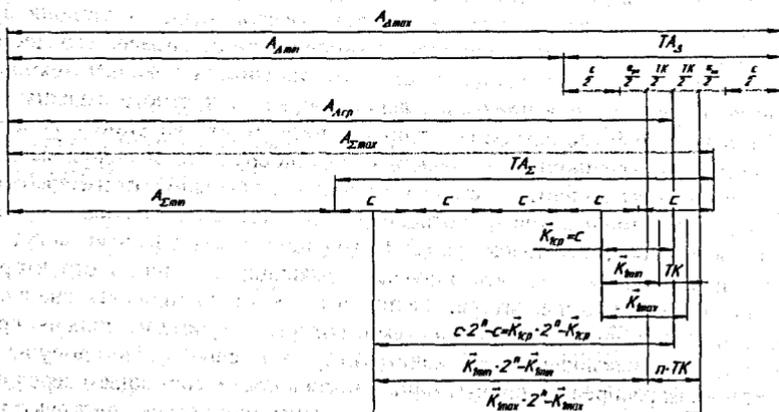


Рисунок 2 – Схема компенсации допусков составляющих звеньев регулированием комплектом неподвижных тонких увеличивающих компенсаторов - членов геометрического ряда

Точность сборки будет обеспечена, если сумма погрешностей на всех этапах определения размера компенсатора и допуск размера набора из  $n$  принятых компенсаторов не превысит  $TA_{\Delta}$

$$TA_{\Delta} \geq C + \varepsilon_{pk} + n \cdot TK. \quad (1)$$

В формуле (1) максимальная погрешность выбора набора компенсаторов принята равной ступени компенсации  $C$ . С такой погрешностью измеренное значение компенсатора воспроизводится на выбранном наборе компенсаторов в самом неблагоприятном случае.

Размер компенсатора  $K_i$  – члена принятого геометрического ряда и сумму конечного числа  $n$  членов такого ряда при  $K_i = C$  можно определить по формулам [3]:

$$K_i = 2^{i-1} \cdot C, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n K_i = (2^n - 1) \cdot C. \quad (3)$$

Минимально достаточное число  $n$  компенсаторов в комплекте для каждого экземпляра изделия должно быть таким, чтобы сумма их размеров равнялась той части  $TA_{\Sigma}$ , которую нельзя компенсировать за счет допуска замыкающего звена конструкторской размерной цепи  $TA_{\Delta}$ , то есть величине  $TA_{\Sigma} - C$ . Тогда

$$\sum_{i=1}^n K_i = (2^n - 1) \cdot C = TA_{\Sigma} - C \quad (4)$$

$$2^n = TA_{\Sigma} / C = N \text{ или } n = \log_2(TA_{\Sigma} / C) = \log_2 TA_{\Sigma} - \log_2 C, \quad (5)$$

где  $N$  – число требуемых ступеней компенсации.

Подставив в (1) выражение (5), получим

$$TA_{\Delta} \geq C + \varepsilon_{pk} + TK \cdot \log_2 TA_{\Sigma} - TK \cdot \log_2 C \quad (6)$$

Численное решение уравнения (6) для определения  $C$  выполнялось методом дихотомии с помощью программы, разработанной в приложении Excel на языке Visual Basic for Application (VBA). Значения  $TA_{\Sigma}$ ,  $TK$ ,  $\varepsilon_{pk}$  корректировались так, чтобы  $n$  получалось целым.

Предлагаемая методика позволяет обоснованно и взаимосвязанно определить число компенсаторов – членов геометрического ряда и параметры точности сборочной оснастки.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Палей, М.А. Допуски и посадки: справочник / М.А. Палей [и др.]: в 2 ч. – СПб.: Политехника, 2001. – 608 с.
2. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПЕРЕДАЧИ ВИНТ-ГАЙКА КАЧЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА С ЧПУ НА ТОЧНОСТЬ КООРДИНАТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

*О.М. Мищирук, В.П. Горбунов*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Металлорежущее оборудование имеет решающее значение при формировании точности обработки, где каждый узел в той или иной степени участвует в достижении требуемой точности изделия. Особое место среди данного вида оборудования занимают многоцелевые станки (МЦС) с ЧПУ, которые обеспечивают высокую точность обработки и производительность, обладая высокой степенью автоматизации. Что, в свою очередь, обеспечивается наличием независимо управляемых системой ЧПУ координатных перемещений рабочих органов, широкого диапазона регулируемых частот вращения шпинделя и подач, автоматической сменой инструмента, заготовок и др. Важное значение в повышении производительности и точности обработки на МЦС с ЧПУ имеют приводы подачи. В настоящее время диапазон скоростей привода подач очень велик. Появление устройств и систем адаптивного управления, обладающих высоким быстродействием, предъявило еще более высокие требования к динамическим характеристикам данных приводов. Нередко именно погрешности приводов подачи являются основным ограничением повышения производительности и точности обработки станков с ЧПУ. Обеспечение высокой точности обработки также вызывает дополнительные требования к статической и динамической точности привода подачи.

На точность обработки координатных перемещений приводами подач влияют как силовые, так и тепловые процессы, возникающие в его элементах. Причем до 40-70% [1] от общей погрешности обработки могут составлять погрешности от тепловых деформаций. Тепловые процессы имеют большой диапазон рассеяния, переменны во времени, носят случайный характер, зависят от многих факторов, не поддаются точному расчету, а также трудно диагностируются.

Предлагаются методы исследования данных погрешностей путем анализа конструкции привода подачи с моделированием теплового воздействия, возникающего при реальных условиях обработки на его узел (ходовой винт) с последующим прогнозированием изменения его начальной точности.

Нагрев ходовых винтов происходит как в результате теплообразования в паре винт-гайка, так и передачи тепла из сопрягаемых деталей, элементов гидросистемы (смазки) МЦС за счет теплопроводности базовых элементов, что вызывает дополнительное перемещение (изменение пространственного положения) узлов и деталей (например, температурное удлинение винта) [2].

Теплообразование в паре винт-гайка является достаточным для нагрева ходового винта прецизионного станка на несколько градусов, что приводит к нарушению точности обрабатываемого изделия.

Экспериментальное исследование тепловых деформаций или температуры нагрева станка является очень трудоемким процессом. В связи с развитием вычислительной техники широкое применение при описании тепловых процессов, происходящих в станках, получили численные методы. Наибольшее распространение получили метод конечных элементов, метод конечных разностей и метод граничных элементов. В нашем случае используется метод конечных элементов, так как он позволяет осуществлять детализацию решений в различных областях изучаемого объекта, что минимизирует погрешности расчета.

Для описания тепловых процессов, происходящих в винте, используется метод математического моделирования, который включает следующие основные этапы:

1. Анализ конструкции передачи с указанием параметров гайки, винта и схемы его закрепления.

2. Выявление основных источников тепловыделения, их вида и месторасположения; условий теплообмена между деталями передачи, а также деталей с окружающей средой и других факторов.

3. Расчет мощности источников, величины и направления тепловых потоков, коэффициентов конвективного теплообмена с окружающей средой.

4. Моделируется тепловая модель базовой детали станка – винта – с оговоренными и обоснованными допущениями на основе математической модели, записанной в виде граничных условий, отражающих связи детали с точки зрения их теплового обмена.

5. Определяется (изменяющееся во времени тепловое поле винта – тепловая задача.

6. На основе теплового поля определяются деформации винта для любого момента времени – решается термоупругая задача.

В качестве граничных условий приложены тепловые поля, определенные при термическом анализе, а также схема закрепления винта в опоре. Для получения деформаций в разных временных интервалах последовательно изменяется тепловое поле, принимаемое из термического анализа. Термоупругий расчет реализован на примере ходового винта МЦС с ЧПУ модели МС 12 – 250, обеспечивающего перемещение салазок станка вдоль координаты У, как наиболее подверженного влиянию тепловых деформаций. Схема закрепления винта – консольная, то есть один конец винта закреплен, а второй свободный. По геометрическим размерам создана трехмерная твердотельная полноразмерная модель винта в графической среде Solid Works, при дискретизации которой построена конечно-элементная сетка (рисунок 1).



Рисунок 1 – Конечно-элементная сетка ходового винта

При определении тепловых деформаций изменение силовых факторов, влияющих на шарико-винтовую передачу, не учитывалось.

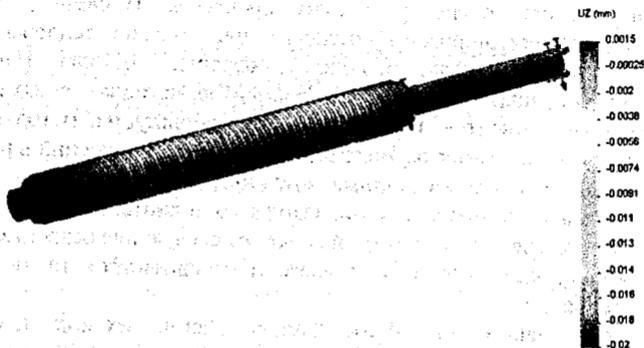


Рисунок 2 – Эпюра линейных смещений винта вдоль оси У

После определения величин и направления тепловых потоков, расчета коэффициентов теплоотдачи, проведен термический анализ нагрева винта от температуры при выключенном станке (принята  $20^{\circ}\text{C}$ ) до наступления теплового баланса (в нашем случае  $25,9^{\circ}\text{C}$ ).

На рисунке 2 приведена эпюра линейных смещений винта вдоль оси У при значении скорости подачи равной 1150 мм/мин через 5 часов работы. По графику деформаций винта (рисунок 3) можно определять смещения в любой точке вдоль его оси. Максимальное линейное смещение винта при тепловых деформациях составило  $\Delta u = 19,8$  мкм.

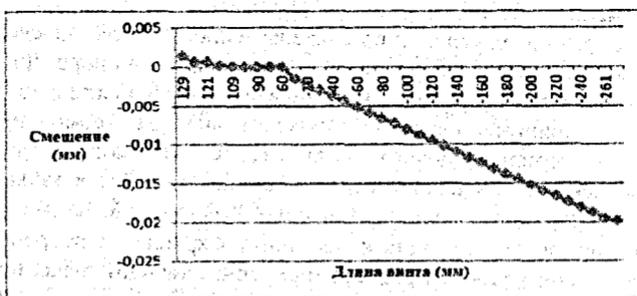


Рисунок 3 – График зависимости деформаций вдоль оси винта

По результатам 3D моделирования можно определять изменяющиеся во времени тепловые деформации винта и прогнозировать изменение геометрической точности привода подач МЦС с ЧПУ.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник: в 3-х т. / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов [и др.]; под общ. ред. А.С. Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. – Т1: Проектирование станков. – 444 с.
2. Соколов, Ю.Н. Термические расчеты в станкостроении. – М.: Машиностроение, 1968. – 77 с.

## СВАРКА ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ОЦИНКОВАННОЙ И НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА.

*Девойно О.Г., Лапковский А.С., Луцко Н.И.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Оцинкованная сталь является достаточно популярным материалом в строительной сфере. Однако в условиях постоянной конкуренции и задач снижения себестоимости все больше применения оцинкованные изделия находят в машиностроении. В машиностроительной сфере оцинкованные изделия наиболее часто выступают заменителями и для более дорогостоящих и менее технологичных в плане обработки коррозионноустойчивых сталей. Все вышесказанное приводит к возрастающей потребности соединения изделий из этих материалов.

Существуют три наиболее распространенных способа получения соединений нержавеющей и оцинкованных сталей. Первым способом является механическое крепление, преимущественно посредством болтовых или клепаных соединений, однако соединение листовых материалов данным способом затруднено плохой обрабатываемостью нержавеющей сталей. Следующим способом является образование паяных соединений, для этих целей применяются припой на основе меди и кремния. Характерной особенностью данного метода является температурный режим от 1050-1100°C, что является достаточным для расплавления припоя и цинкового покрытия, однако прочность соединения при этом методе существенно ниже прочности материала. Наиболее популярным и эффективным является метод сварки в различных модификациях, но и он не лишен недостатков. Температура плавления цинка составляет 420°C, а температуры выше 906°C приводят к кипению цинка. Данный факт представляет значительные трудности при процессах обработки, связанных со значительным тепловым вкладом. Так, при электродуговой сварке пары цинка создают повышенную вероятность появления пористости, происходит нарушение цинкового покрытия на величину не позволяющую обеспечить коррозионную защиту. Это приводит к необходимости последующей операции по восстановлению покрытия, кроме того, зачастую, существует необходимость сохранения внешнего вида материала с оборотной стороны шва, что ограничивает применение методов, в которых инструмент контактирует с изделием. Указанных сложностей в процессе сварки можно избежать путем применения концентрированных источников энергии, в частности лазерного излучения.

К основным преимуществам лазерной сварки относят [1]: высокие скорости сварки; высокие плотности мощности лазерного излучения, что позволяет добиться локальности воздействия и минимизировать тепловой вклад; низкие тепловые деформации; возможность сварки разнородных материалов; выполнение сварки в труднодоступных местах, при любых пространственных положениях шва; относительная простота переналадки комплексов лазерной обработки для обработки другой номенклатуры деталей.

Целью проведенных исследований являлось определение целесообразности применения лазерной сварки оптоволоконными лазерами листовых материалов из оцинкованной и нержавеющей стали при схемах сварки встык и внахлест.

Для исследования применялась 3-координатная система, укомплектованная оптоволоконным лазером IPG модели YLR-1000, имеющим следующие характеристики: максимальную выходную мощность – 1 кВт; длина волны излучения – 1,06 мкм; тип излучения – многомодовый; режим модуляции – квазинепрерывный; фокусное расстояние линзы – 150 мм; диаметр сфокусированного луча – 0,16 мм. Защитным газом являлся аргон. Сварка производилась на образцах из стали AISI304 и оцинкованной стали 0,8кп 40х250 мм, толщинами 1 и 2 мм.

Первоначально проводилась сварка образцов «встык». Первые же эксперименты показали, что при сквозном проваре и газовой защите шва как с лицевой, так и с тыльной стороны, процесс сварки оцинкованных и нержавеющей сталей идентичен процессу сварки нержавеющей и низкоуглеродистых конструкционных сталей. В процессе обработки цинк испаряется с поверхности материала и удаляется потоком защитного газа, не нанося ущерб качеству соединения. Оптимальные режимы для процесса сварки встык представлены в таблице 1. При сварке деталей толщиной в 1 и 2 мм образовывался узкий шов шириной 0,5 мм и 0,8 мм соответственно, а испарение цинка с поверхности не превышало 0,7 мм и 0,9 мм, что позволяет говорить об отсутствии нарушения анодной защиты и отсутствии необходимости дополнительных операций. При отсутствии газовой защиты обратной стороны шва существенно увеличивалась зона повреждения покрытия и ухудшался внешний вид тыльной стороны шва.

Однако следует отметить, что из-за маленького фокусного расстояния образцы находились близко от головки, что приводило к быстрому выходу из строя защитных стекол, предположительно вызванных воздействием паров цинка, т.к. при сварке образцов без покрытий данная проблема не наблюдалась.

Таблица 1 – Режимы сварки образцов при сварке «встык».

Толщина, мм	Скорость сварки, мм/мин	Мощность излучения, Вт	Положение фокуса, мм	Расход защитного газа, л/мин
1	5500	1000	-0,4	10
2	3400	1000	-0,7	10

При сварке «внахлест» расположение свариваемых материалов не влияло на характеристики шва, только на внешний вид шва. В дальнейших экспериментах подложкой выступала нержавеющая сталь.

Первоначальные образцы выполненные на режимах характерных для сварки нержавеющей и конструкционной стали, при сварке внахлест имели большое количество дефектов (поры, раковины, непровар, нарушения геометрии шва). Незначительное понижение скорости и увеличение расхода защитного газа до 20л/мин для толщины 1мм и до 30 л/мин для толщины 2 мм позволило практически полностью избавиться от пористости, однако привело к выдуванию части металла из сварочной ванны. Наиболее вероятно, что снижение пористости, связано с эффектом стабилизации парогазового канала описанным Г. Белерини[2], т.к. защитный газ в зону сварки подавался как радиально, так коаксельно. Эффект не наблюдался при отсутствии сквозного проплавления.

С целью обеспечения бездефектного соединений при сварке нержавеющей и конструкционной стали «внахлест» была применена схема сварки представленная на рисунке 1.

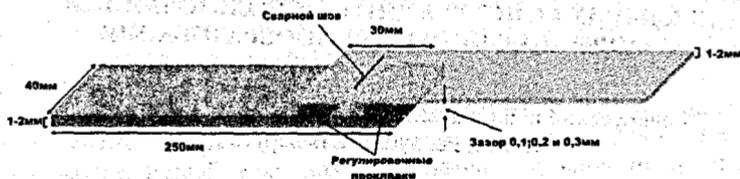


Рисунок 1 – Схема процесса сварки «внахлест»

Особенностью данной схемы является наличие прокладок для обеспечения постоянного зазора между свариваемыми пластинами с целью обеспечения возможности выхода паров цинка не только через парогазовый канал.

Данный способ позволил получить шов высокого качества без внешних и внутренних дефектов. Режимы для схемы сварки «внахлест» представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы сварки образцов при сварке «внахлест»

Толщина, мм	Величина зазора, мм	Скорость сварки, мм/мин	Мощность излучения, Вт	Положение фокуса, мм	Расход защитного газа, л/мин
1	0	3300	1000	-0,7	20
2	0	2750	1000	-1,2	30
1	0,2	2800	1000	-0,7	10
2	0,2	2100	1000	-1,2	10

Увеличение зазора более 0,2мм приводило к частичному несплавлению шва.

Из всего вышеперечисленного можно сделать следующие выводы:

1. Применение аргона в качестве защитного газа является достаточным при сварке волоконными лазерами, отсутствует необходимость добавления гелия (как в  $CO_2$ ).

2. Сварка нержавеющей и оцинкованных листов встык может осуществляться без дополнительной подготовки на режимах, близких к режимам сварки нержавеющей и конструкционных сталей.

3. При сварке нержавеющей и оцинкованных сталей внахлест единственным эффективным инструментом борьбы с образованием дефектов является обеспечение постоянного зазора между свариваемыми частями.

4. При сварке нержавеющей и оцинкованных сталей внахлест без зазора при полном проплавлении возможно избежать дефектов в объеме шва путем существенного увеличения давления защитного газа, однако это приводит к выдуванию металла из ванны расплава и образованию наружных дефектов.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц [и др.]; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 667 с.

2. Сварка твердотельными и  $CO_2$  -лазерами листовой оцинкованной стали и нестандартных заготовок в среде аргона и в смесях на его основе / Г. Белерини[и др.] // Фотоника. – 2013. – №4. – С. 52-65.

## ПАССИВНЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕФОРМАЦИОННОГО ТЕПЛООБРАЗОВАНИЯ

*Мойсейчик А.Е.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Такой метод успешно реализован для контроля теплозащитных функций ограждающих конструкций зданий и сооружений, выявления дефектных участков, нагрев которых происходит за счет энергии горячих процессов, электрического тока, энергии трения, колебательных движений[1]. В единичных случаях этот метод применялся для контроля работоспособности конструкций, выявления дефектных зон, при контроле зарождения и развитии разрушения элементов конструкций. Так, в работе [2] пытались разработать методику пассивного теплового контроля для выявления дефектных зон несущих стальных конструкций мостовых кранов. При этом использовалась панорамная съемка конструкции моста крана термографом «ИРТИС-2000» и в итоге получен трудно различимый сигнал на уровне чувствительности прибора. В работе [3] термографом той же модели удалось выявить не только изменение температуры элементов упруго нагруженной подкрановой балки, но и визуализировать границы остаточных сварочных напряжений в стальной конструкции. Во втором случае повышение контрастности теплового сигнала получили за счет небольшой накачки механической энергии в балке и фокусирования термографа на дефектной зоне.

В связи с изложенным сформулируем основные методологические положения, соблюдение которых необходимо для получения контрастного теплового сигнала с использованием деформационного тепла и достоверного выявления дефектных зон в составе стальной конструкции. Как правило, дефектные участки стальных конструкций, нагруженных собственным весом, эксплуатационной нагрузкой, находятся в тепловом взаимодействии с прилегающими участками более холодного металла и омывающей воздушной средой. Возникающий при этом кондуктивный и конвективный теплообмен ведет к выравниванию температур смежных участков металла.

В таких условиях контрастный тепловой сигнал можно получить при выполнении следующих условий.

1. Предварительно необходимо выявить места расположения конструктивно-технологических дефектов в исследуемой стальной конструкции. Это производится или на основании предварительного упруго-пластического расчета конструкции, или на основании использования аналогов, опыта исследования конструкций. При этом целесообразно определить величину нагрузки, при которой появляются пластические деформации в концентраторах (дефектах).

2. Исследуемую конструкцию необходимо нагрузить усилиями, величина которых должна быть не выше 50-80% от предельно допустимых. Более достоверные результаты термографирования будут при 2-х, 3-кратном последовательном приложении нагрузки (накачка конструкции энергией).

3. Инфракрасное компьютерное термографирование следует производить в процессе нагружения с 2-кратным дублированием. Методика съемки должна учитывать технические характеристики используемого компьютерного термографа. Как правило, при выявлении дефектов в стальных конструкциях панорамную съемку не следует применять. Расстояние от объектива термографа до исследуемой поверхности необходимо принимать в пределах 0,5-2 м. Съемку следует вести в условиях минимального инфракрасного излучения среды, внешних тел. Требования к термографируемой поверхности минимальные (хорошая видимость, эксплуатационное покрытие поверхности (слой краски, окатины, равномерный слой пыли можно не снимать, удалить только набрызги грязи, бетона и т.п. неоднородности)).

Пассивный тепловой метод в Беларуси широко применяется для контроля теплопотерь зданий и сооружений. Для контроля работоспособности несущих конструкций, выявления дефектов, участков зарождения разрушения конструкций, т.е. для предотвращения аварий и чрезвычайных ситуаций, на белорусских производствах с повышенной опасностью этот метод практически не применяется. Объяснить это можно как отсутствием необходимой нормативно-правовой базы в республике, так и неподготовленностью персонала. Как следует из приведенного выше краткого анализа моделей теплообразования, в твердых деформируемых телах для успешного применения тепловых методов неразрушающего контроля машиностроительных, строительных, нефтехимических и других металлических конструкций, персонал должен обладать достаточными знаниями и умениями как в области теплофизики твердого тела, так и механики конструкций. Методом пассивного теплового неразрушающего контроля с использованием деформационного теплообразования по изложенной выше методологии можно надежно контролировать состояние стальных конструкций, работающих в составе объектов повышенной опасности (резервуары, газгольдеры, трубопроводы, грузоподъемные машины и механизмы, пролетные конструкции стальных мостов и других конструктивных систем). Эти конструкции имеют свои особенности, которые должны учитываться при разработке технологических документов неразрушающего теплового контроля. Из сказанного следует, что внедрению тепловых методов контроля будет способствовать комплексная работа по направлениям, показанным на рисунке 1.



ного следует, что внедрению тепловых методов контроля будет способствовать комплексная работа по направлениям, показанным на рисунке 1.

Рисунок 1 – Приоритетные направления разработки обеспечений тепловых методов неразрушающего контроля

В первую очередь необходимы усилия по разработке нормативно-технической базы теплового неразрушающего контроля. В энергетике, нефтехимии, железнодорожном транспорте нет руководящих документов с изложением регламентирующих требований по технологии проведения пассивного теплового контроля. Такая документация отсутствует и в департаменте по надзору за безопасным ведением работ в промышленности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (Госпромнадзор). Для сравнения следует указать, что в аналогичных ведомствах Российской Федерации имеется более развитая нормативная база, регламентирующая применение тепловых неразрушающих методов на объектах повышенной опасности (РД-13-04-2006, РД-153-34.0-20.363-99, РД-153-34.0-20.364-00, МДС 23-1.2007, ФР.1.32.2006.026657, ПГЭ 2.3.5.-2012/3 и другие).

#### **Выводы**

1. Сформулированы основные требования к технологии такого контроля.
2. Выявлены недостатки и намечены пути внедрения тепловых методов контроля работоспособности несущих конструкций на объектах повышенной опасности Беларуси.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Будадин, О.Н. Тепловой контроль / О.Н. Будадин, В.П. Вавилов, Е.В. Абрамова. – М.: ИД Спектр, 2011. – 230 с.
2. Котельников, В.В. Разработка методики теплового контроля и диагностики технического состояния металлоконструкций мостовых кранов: автореферат дисс. на соиск.уч.ст. к.т.н. – М.: МВТУ, 2009. – 18 с.
3. Мойсейчик, Е.А. Выявление опасных зон в стальных подкрановых балках по изменению деформационного температурного поля/ Е.А.Мойсейчик // Вестник гражданских инженеров, 2013: – 6(41). – С. 28-34.

УДК 621.7

### **БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ LOM-ТЕХНОЛОГИИ**

*Доминикевич В.В., Веремей П.В., Левков К.Л.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Решить задачи научно-исследовательских и опытно-конструкторских (технологических) разработок (НИОКТР) во многом пытаются с помощью систем автоматизированного проектирования – САПР (англ. термин – Computer Aid Design (CAD)), профессиональных программных продуктов фирм Autodesk, Аскон и др. Однако наибольшие трудности возникают при изготовлении нестандартных, сложных по своей конфигурации деталей в различных отраслях промышленности, которые часто являются самой трудоёмкой и дорогостоящей частью всего проекта. Остро стоит вопрос представления полноценной физической модели будущего изделия в кратчайшие сроки при оптимальных затратах.

Для этих целей возможно применение технологий быстрого прототипирования. В данной статье представлена технология послойного создания деталей (моделей деталей) путём склеивания (ламинирования) металлических слоёв, вырезанных с помощью установки лазерной резки.

ЛОМ (от англ. Laminated Object Modeling) – технология быстрого прототипирования моделей деталей, основанная на том, что слои прототипа создаются при помощи ламинирования (склеивания) бумажного (картонного, металлического) листа. Контур слоя вырезается лазером с определённой длиной волны (дерево и бумага – 10,6 мкм, металл – 1,06 мкм). После извлечения слоя излишки материала легко удаляются [1,2].

В качестве детали для трёхмерного выращивания была выбрана модель рабочего колеса турбины (рисунок 1).

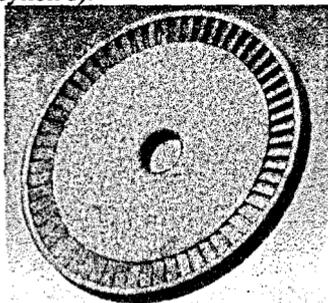


Рисунок 1 – Модель рабочего колеса турбины с бандажом

Процесс создания («выращивания») модели колеса состоял из следующих элементов:

1. Детальная прорисовка модели в среде твердотельного моделирования проводилась в Autodesk Inventor Professional 2014. Модель колеса представлена на рисунке 1. Для проектирования подходит любая рабочая среда, поддерживающая функцию твердотельного моделирования (Autocad Mechanical, Solid Works, Компас 3D и др.).

2. Выбор материала и его толщины для выращивания. Любая модель детали должна отвечать предъявленным к ней требованиям. Для турбинного колеса они следующие:

- жёсткость конструкции;
- возможность работы при температурах от  $+50^{\circ}\text{C}$  до  $+400^{\circ}\text{C}$ ;
- высокая однородность материала до и после лазерной резки (что исключит необходимость балансировки при частоте вращения до  $3000 \text{ мин}^{-1}$ ).

Определив конечные требования к модели турбинного колеса, следует выбрать материал, который их обеспечит. Бумага и картон не обеспечат жёсткости, а пластик после лазерной резки не обладает достаточной однородностью (он оплачивается, и при этом изменяется его плотность). Таким образом, материал для выращивания детали (турбинного колеса) выбираем из номенклатуры листового металла. Толщина листа должна быть минимальной для наибольшей

точности изготовления. Всем предъявленным требованиям соответствует сталь электротехническая любой марки, так как она к тому же хорошо клеится. Для экспериментальной части использовали электротехническую сталь 3413 по ГОСТ 21427.1 – 83.

3. Разбиение модели детали на слои с последующим сохранением их с расширением .dxf. Модель колеса была разбита на 35 слоёв (толщиной 0,4 мм).

4. Отправка чертежей на станок для лазерного раскроя, перевод чертежей в программы обработки контуров. Был выбран станок лазерной резки металла ЛС-1,0 на базе оптоволоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт. Программа для создания управляющего кода для ЧПУ – СпсКад 9.5.

Текст программы созданной ЧПУ можно просмотреть, а опытному пользователю и редактировать.

5. Далее происходит вырезание слоёв будущей детали. Было вырезано 35 слоёв. Пример того, как выглядит каждый конкретный слой можно увидеть на рисунке 2.

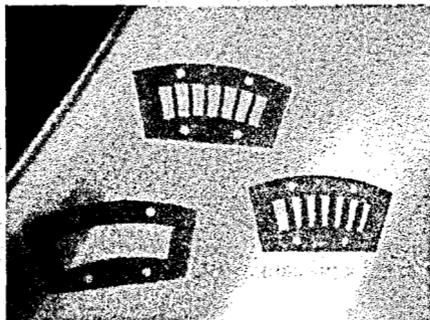


Рисунок 2 – Слои будущей детали

6. Склеивание слоёв после вырезки не проводилось, так как модель должна быть разборной. Вместо этого она была свинчена болтами и представлена на рисунке 3. Точность модели – 0,35 мм, шероховатость модели – Rz350. Точность изготовления слоя – 0,01 мм, шероховатость слоя – Ra5.

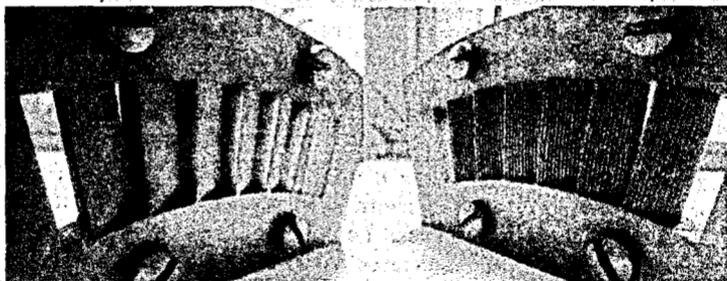


Рисунок 3 – Внешний вид собранной модели элемента турбинного колеса

Полученная модель обладает следующими технико-экономическими показателями (в ценах 2014 года):

Стоимость материала (1 кв. м) – около 3000 бел. руб.

Стоимость изготовления – около 360000 бел. руб.

Время, затраченное на проектирование, создание модели, подготовку чертежей, создание управляющих программ, вырезание и сборку изделия – в среднем 4 часа.

При изготовлении модели этой же детали с аналогичными выходными параметрами на обрабатывающем центре (например, Hermle C20) сроки изготовления составили бы не менее 6 часов, себестоимость обработки – 1600000 бел. руб.

Таким образом, ЛОМ-технология позволяет сократить время изготовления деталей в 1,5 раза, а себестоимость изготовления сократить в 4-5 раз.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Технологии быстрого прототипирования в Республике Беларусь: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и молодых учёных / Т.В. Потапенко, К.Л. Левков. – Гомель. – 2012. – 512 с.

2. Технологии получения сложнопрофильных деталей энергоустановок в опытном производстве: материалы II Респ. науч.-техн. конф. / К.Л. Левков, П.В. Потапенко, П.В. Веремей. – Гродно: ГрГУ, 2012. – С. 127-129.

УДК 621.762

## **БОРСОДЕРЖАЩИЙ СПЛАВ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ИЗ ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ**

*Щербаков В.Г.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

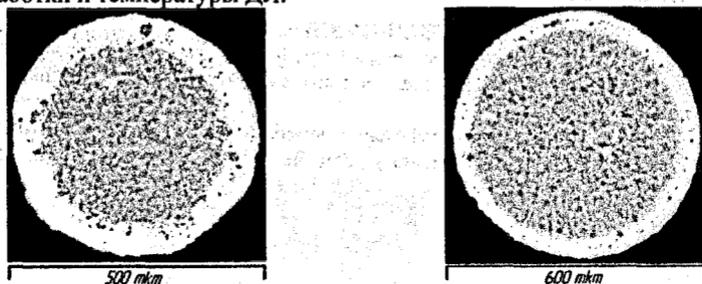
Известно, что использование импортных наплавочных порошков для восстановления и упрочнения деталей машин широко применяется на предприятиях Республики Беларусь. Однако данные наплавочные материалы дороги, и свойства получаемых защитных покрытий на их основе часто являются «завышенными» требованиям конструктора. Поэтому активно проводятся работы по созданию отечественных наплавочных сплавов из металлических отходов. Проведенные ранее исследования [1-4] позволили выбрать наиболее подходящие параметры для проведения диффузионного легирования (ДЛ) чугуновой дроби ДЧЛ 08 и разработать конструкцию промышленной установки для производства диффузионно-легированных наплавочных порошков [5].

На установке [5] обработку чугуновой дроби ДЧЛ 08 размером 200-600 мкм проводили по различным режимам: в одном контейнере, в трех контейнерах и в четырех контейнерах. Исследование режима диффузионного легирования с одним контейнером показало, что в порошке присутствует явно выраженный бо-

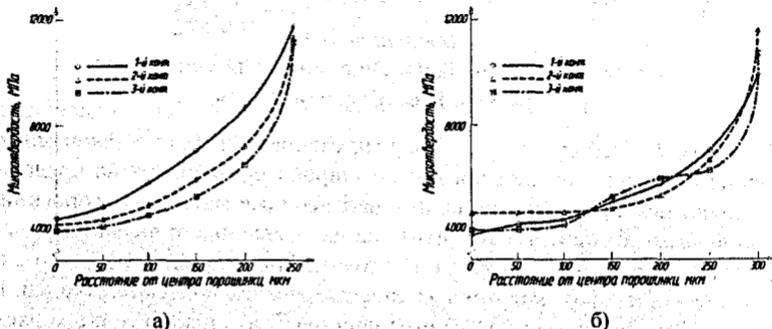
ридный слой толщиной 40-80 мкм (рисунок 1). Микротвердость по сечению дробы ДЧЛ 08 составляет порядка 12000-14000 МПа на краю и постепенно снижается до 4000-5000 МПа к сердцевине.

Из-за ДЛ отходов увеличились геометрические размеры дробы и, кроме анализа микротвердости по сечению дробы с размером 200-600 мкм, дополнительно исследовалось распределение микротвердости по сечению порошка с размерами более 630 мкм (рисунок 2).

Установлено, что максимальная толщина борированного слоя у ДЛ дробы из первого контейнера составляет 100-150 мкм, по причине длительности выдержки во время ДЛ. Толщина борированного слоя у дробы из контейнеров № 2 и № 3 составляет 50-80 мкм. Меньшая толщина слоя связана с уменьшением времени обработки и температуры ДЛ.



а – ДЧЛ 08 после ДЛ (менее 600 мкм); б – ДЧЛ 08 после ДЛ (более 600 мкм)  
Рисунок 1 – Микроструктура дробы ДЧЛ 08 после ДЛ



а – размер дробы 200-630 мкм; б – размер дробы более 630 мкм  
Рисунок 2 – Распределение микротвердости по сечению ДЛ дробы ДЧЛ 08, обработанной в трех контейнерах

При исследовании микротвердости диффузионно-легированной дробы выявлено, что микротвердость дробы с размерами фракции 200-630 мкм, по сечению выше, чем у дробы с размерами более 630 мкм. Это связано с уменьшением контактных давлений из-за увеличения геометрических размеров дробы и затруднением диффузии бора в центр порошка.

Смеси для наплавки изготавливали на РУП «МЗШ» посредством механического смешивания наплавочного порошка ФБХ-6-2 и диффузионно-легированной в лаборатории кафедры дробы ДЧЛ 08 с плавкой бурой ( $\text{Na}_2\text{V}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) в различных пропорциях. Наплавку осуществляли в кольцевом индукторе.

На рисунке 3 представлены микроструктуры, полученные в результате индукционной наплавки смесей двух различных составов. Наплавленные слои характеризуются доэвтектическим, эвтектическим и заэвтектическим строением. Твердость наплавленных слоев составляет 55-62 HRC. Пористость в слоях незначительная и составляет порядка 3-5 %.



а – состав № 1; б – состав № 2

Рисунок 3 – Микроструктура наплавленного слоя

У линии сплавления наплавленный сплав имеет четко выраженную дендритную структуру. В верхнем слое сплава содержатся включения первичных карбидов веерообразной формы. Также между наплавленным сплавом и стальной основой обнаружена переходная зона, что свидетельствует о полном сплавлении основы и наплавленного слоя. Микротвердость слоев составляет 7385–9780 МПа и связана с высокой степенью легированности ее фазовых составляющих.

Установлено, что получаемые при использовании ДЛ отходов чугунной дробы наплавочные покрытия по свойствам соответствуют предъявляемым РУП «Минский завод шестерен» требованиям к изготавливаемым на участке упрочнения рабочим органам почвообрабатывающих машин.

Таким образом, установлены особенности структуры борированного порошка из чугунной дробы и влияние на него метода ХТО в подвижной порошковой смеси. В частицах ДЧЛ 08 после ХТО происходит процесс графитизации. Показана возможность получения покрытий методом наплавки ТВЧ из ДЛ бором отходов дробы ДЧЛ 08.

Анализ микроструктуры и микротвердости получаемых покрытий позволяет сделать вывод о том, что использование данной ДЛ чугунной дробы в качестве наплавочного материала позволит получать абразивостойкие покрытия индукционной наплавкой с твердостью наплавленного слоя 55 – 60 HRC.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них / Ф.И. Пантелеенко. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.

2. Константинов, В.М. Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / В.М. Константинов. – Минск, 2008. – 475 л.
3. Ворошнин, Л.Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.
4. Штемпель, О.Г. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / О.Г. Штемпель ; Полоцкий гос. ун-т. – Новополоцк, 2003. – 25 с.
5. Вращающаяся электрическая печь для химико-термической обработки сыпучего материала: пат. 15412 Респ. Беларусь, МПК7 F27B 7/14 / В.М. Константинов, О.П. Штемпель, В.Г. Щербаков; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20091415 ; заявл. 05.10.09 ; опубл. 28.02.12 // Афишны бюл. / Нац. центр інтэл. уласнасці . – 2012. – № 1. – С. 143.

УДК 621.762

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДИФFUЗИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В ПОДВИЖНОЙ ПОРОШКОВОЙ СРЕДЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДНЫХ ВОЛОКОН

*Щербаков В.Г.<sup>1</sup>, Чугаев П.С.<sup>2</sup>*

1) Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь.

2) Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Использование медных отходов кабельной промышленности в качестве основы для производства волокнистых фильтрующих материалов является актуальной в связи с повышением цен на импортные материалы. Однако использование данного материала для получения фильтрующих материалов спеканием в исходном состоянии имеет ряд недостатков, а именно: высокая температура спекания и высокие значения давления прессования [1-3].

Одним из возможных путей влияния на технологические свойства медных волокон является предварительное диффузионное легирование в подвижной порошковой среде (порошок цинка). Известно, что цинк повышает прочность и пластичность меди, но только до 30 %. Исходя из диаграммы состояния Cu-Zn, цинк также снижает и температуру плавления меди. Предполагается, что предварительная обработка в подвижной порошковой среде позволит получить на поверхности каждого отдельного медного волокна диффузионный слой, согласно диаграмме состояния Cu-Zn, представляющий собой твердый раствор с меньшей температурой плавления.

Диффузионное легирование (цинкование) медных волокон осуществляли в специальной установке для ХТО микрообъектов [4]. Составы смесей подбирались экспериментально, температура обработки составляла 400°C, время – 30 мин.

Внешний вид исходных медных волокон до и после диффузионного легирования представлен на рисунке 1.



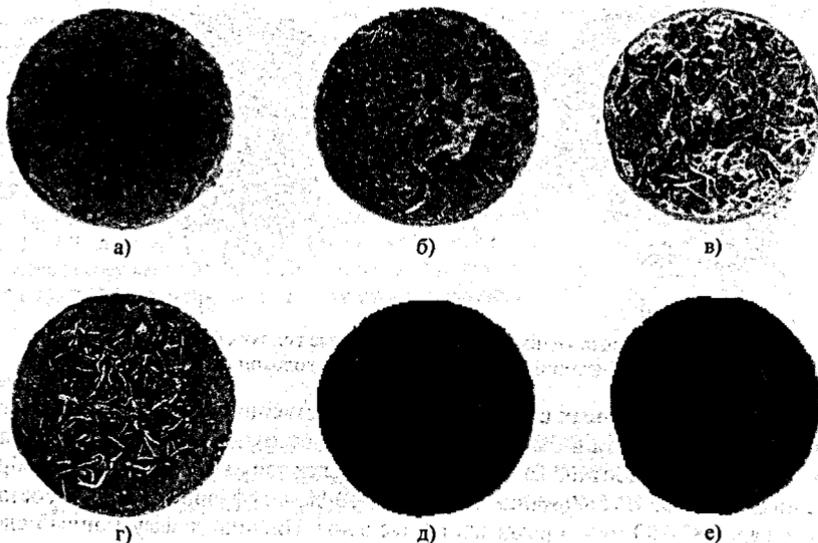
а) — исходные медные волокна; б) — медные волокна после ДЛ  
 Рисунок 1 — Внешний вид исходных медных волокон до и после ДЛ

Толщина диффузионных слоев после ДЛ существенно зависит от количества насыщающего элемента в смеси и микропластических деформаций, возникающих в процессе обработки. Так, в поверхностных слоях медных волокон, обработанных в смеси с содержанием цинка 30-50 %, диффузионный слой составляет порядка 80-100 мкм и разделен на две зоны. Нижний диффузионный слой является твердым раствором цинка в меди высокой концентрации (рисунок 1). Данный слой обладает высокой прочностью и пластичностью.

Верхний диффузионный слой в медных волокнах, из-за высокой концентрации цинка, состоит из  $\gamma$ ,  $\epsilon$ , и  $\delta$  — фаз различной концентрации. Образование данных фаз приводит к резкому снижению прочности и пластичности. В медных волокнах, обработанных в смеси с содержанием цинка 5-20 %, образуются диффузионные слои с толщиной 30-50 мкм. Визуально разделения слоев на зоны не наблюдается, вследствие малой концентрации насыщающего элемента. Пористость диффузионных слоев составляет порядка 5-8 % при концентрации цинка 50 % и снижается с уменьшением насыщающего элемента в смеси. Высокая пористость в образовавшихся слоях с концентрацией цинка 30-50 % объясняется высокой концентрацией насыщающего элемента и одновременной микропластической деформацией волокон во время обработки. В медных волокнах после обработки с меньшей концентрацией цинка образуются слои с минимальной пористостью, порядка 1-2 %.

Внешний вид получаемых ФМ после спекания предварительно ДЛ цинком медных волокон показаны на рисунке 2.

Анализ ДЛ меди цинком в подвижной порошковой среде с различными концентрациями выявил, что при содержании цинка в смеси более 30% он резко снижает пластичность и прочность медных волокон и прессование не происходит. Оптимальным содержанием цинка в смеси установлено 10%. При данном содержании цинка при ДЛ на поверхности медных волокон образуется слой  $\alpha$ -фазы, различной концентрации, что положительно влияет на прессование и снижение температуры спекания. Экспериментальные исследования выявили снижение давления прессования с 20-25 тонн до 10-15 тонн и температуры спекания с 1020° С до 860° С.



а – 50 % Cu + 50 % Zn; б – 60 % Cu + 40 % Zn; в – 70 % Cu + 30 % Zn;  
 г – 80 % Cu + 20 % Zn; д – 90 % Cu + 10 % Zn; е – 95 % Cu + 5 % Zn

Рисунок 2 – Образцы после спекания в зависимости от содержания Zn в смеси, %мас

При спекании волокон с содержанием цинка в насыщающей смеси 30-50 % спекание образцов не произошло, образец разрушался во время извлечения его из печи, так как в поверхностных слоях присутствовали хрупкие  $\gamma$  и  $\epsilon$ -фазы. Спекание медных волокон, обработанных в смеси с содержанием цинка 10...20 %, произошло во всем объеме образца из-за образования в поверхностных слоях пластичной  $\alpha$ -фазы различной концентрации.

ДЛ меди цинком положительно влияет на технологические свойства медных волокон и позволяет снизить энергетические затраты при производстве ФМ. Анализ результатов по спеканию образцов показал, что лучшие результаты спекания у образцов, обработанных в смеси с содержанием цинка 10-20 %. Исследован один из способов влияния на технологические свойства медных отходов кабельной промышленности при изготовлении фильтрующих материалов.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Щербаков, В.Г. Влияние кратковременного высокотемпературного воздействия и предварительного диффузионного легирования на температуру плавления сплавов на железной и медной основах / В.Г. Щербаков, П.С. Чугаев // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 12-14 сент. 2012 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: П.А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 325 с.
2. Щербаков, В.Г. Исследование диффузионного легирования медных отходов производства / В.Г. Щербаков, П.С. Чугаев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2011 г.: в 3 т. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: Б.М. Хрусталев [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 347.

3. Щербаков, В.Г. Влияние предварительного диффузионного легирования медных откодов кабельной промышленности на эксплуатационные свойства получаемых из них фильтрующих материалов / В.Г. Щербаков, П.С. Чугаев // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Международной научно-технической конференции / Белорус. нац. технич. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [ и др.]. – Минск, 2012. – С. 375 – 376.

4. Вращающаяся электрическая печь для химико-термической обработки сыпучего материала: пат. 15412 Респ. Беларусь, МПК7 F27B 7/14 / В.М. Константинов, О.П. Штемпель, В.Г. Щербаков; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20091415; заявл. 05.10.09; опубл. 28.02.12 // Афишны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – С. 143.

УДК 621.785.532.062.57

## **ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НАСЫЩАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ**

*Саханько С.А., Рутько Н.Н., Нерода М.В.*

Барановичский государственный университет, Барановичи,  
Республика Беларусь

**Введение.** Одна из важнейших проблем современного машиностроения — совершенствование технологии производства деталей. Актуальность ее решения возрастает в связи с разработкой техники нового поколения, ростом силового и теплового напряжения всех деталей, включая элементы двигателей, зубчатых передач, несущих конструкций и многих других ответственных элементов.

Важнейшим направлением повышения технических и эксплуатационных характеристик многих изделий техники является увеличение срока службы и надежности ответственных нагруженных деталей и узлов при сохранении или улучшении предъявляемых к ним конкретных требований по трибологии, физико-механическим, теплофизическим и прочим специальным свойствам, а также требований к материалам, из которых они изготавливаются.

Перспективным методом является ионно-плазменное азотирование (ИПА). Азотирование — процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя сталей и сплавов азотом при нагревании в азотсодержащей среде [1]. Этот процесс ХТО является высокопроизводительным, ресурсосберегающим и безотходным, который обеспечивает преимущественные качества и служебные свойства на любых сталях, сплавах и металлокерамике, что отвечает современным требованиям [2].

С помощью ИПА можно добиться создания поверхностного слоя с высокой твердостью, износостойкостью, повышенной усталостной прочностью и высоким сопротивлением коррозии. При этом основными характеристиками свойств металла, которые должны указываться в конструкторской документации и подвергаться контролю, являются: микроструктура упрочненного слоя, твердость на поверхности, эффективная твердость упрочненного слоя, твердость сердцевины и общая эффективная толщина упрочненного слоя.

Влияние на качество глубину, структуру и свойства азотируемого слоя оказывают следующие факторы процесса:

- изменение плотности тока;
- изменение расхода азота;
- изменение степени разряджения.

Значительное влияние на качество оказывают примеси и добавки в азотосодержащей среде. Кроме этого, в процессе ИПА используются особо чистые технологические газы, такие как водород, аргон, метан, азот.

Целью исследования являлось изучение влияния качества насыщающих газов на свойства азотированного слоя — были взяты два баллона, в одном из которых до заправки азотом была углекислота, что может быть в производстве, поскольку внешне баллоны не отличаются. Предварительно выпустив оставшиеся газы, баллоны были переданы на заправку в компанию «Еврогрупп». Дальнейшей задачей являлось исследование: как повлияет на свойства азотированного слоя качество газа. Для этих целей были использованы образцы из сталей 40X, 25XГТ, 38X2МЮА и два режима обработки, с различной степенью чистоты насыщающей среды.

**Результаты исследования и их обсуждения.** Задача исследований заключалась в том, чтобы исследовать изменение свойств азотированного слоя деталей обработанных в различных по качеству насыщающих средах при одинаковой температуре и длительности выдержки. В одной из сред была применена особо чистая газовая смесь, а во второй газовой смеси была примесь углекислого газа, затем было проведено сравнение микротвёрдости и глубины упрочнённого слоя. При этом особое внимание уделялось характеру изменения микротвёрдости по глубине азотируемого слоя.

После азотирования первых образцов в особо чистой газовой смеси при 10-часовом режиме выдержки на поверхности сформировался упрочнённый слой глубиной до 60 мкм. Результаты замеров твердости показали, что для первой детали изготовленной из стали 40X, поверхностная твёрдость составила 620...625 HV, твердость сердцевины 264 HV. Для второй детали из стали 25XГТ поверхностная твёрдость составила 670...675 HV, твёрдость сердцевины 262HV; у третьей детали из стали 38X2МЮА поверхностная твёрдость составила 795...800 HV, твёрдость сердцевины 325 HV.

Также были обработаны оставшиеся образцы в газовой среде с содержанием примеси углекислого газа, на поверхности также сформировался упрочнённый слой глубиной до 60 мкм. После были сделаны замеры поверхностной твёрдости, для детали из стали 40X она составила 475...480 HV. Для детали из стали 25XГТ поверхностная твёрдость получилась 575...580 HV, и для детали из стали 38X2МЮА поверхностная твёрдость составила 650...655 HV.

В результате проведенных испытаний были построены графики распределения микротвёрдости по глубине азотированного слоя для деталей, азотируемых в разных по качеству насыщающих средах выполненных из стали 40X (рисунок 1), из стали 25XГТ (рисунок 2), деталь, выполненная из стали 38X2МЮА (рисунок 3).

Из полученных зависимостей видно, что при применении особочистой газовой смеси изменение микротвёрдости для сталей 40X и 25XГТ идёт равномерно по дуге, чего не наблюдается при использовании азота из баллона, в котром до этого была углекислота, в этом случае на деталях прослеживается резкое падение микротвёрдости азотированного слоя на глубине от 0...0,05 мм, а на глубине от 0,05...0,3 микротвёрдость снижается более плавно ближе к прямой, и к концу слоя влияние углекислого газа практически не наблюдается (рисунки 1 и 2).

Для стали 38X2МЮА в начале слоя также наблюдается резкое падение микротвёрдости, но ближе к середине она возрастает и практически не отличается от детали, азотированной в особочистой насыщающей смеси (рисунок 3). В среднем микротвёрдость снизилась на 25%.

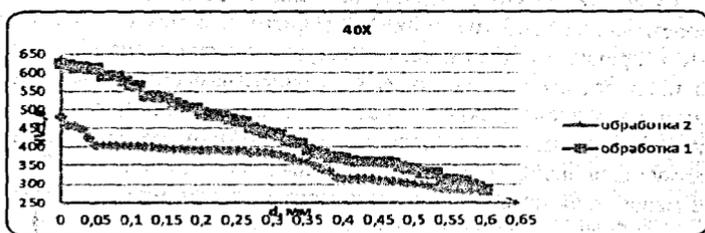


Рисунок 1 – График изменения микротвёрдости по глубине для детали из стали 40X

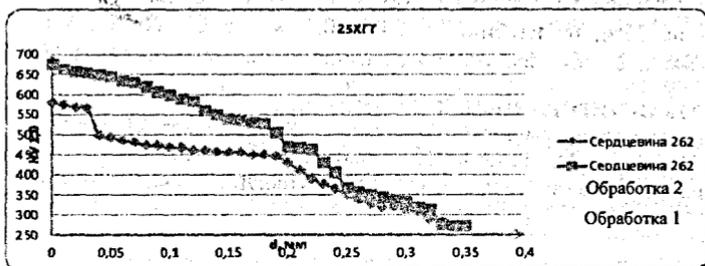


Рисунок 2 – Изменение микротвёрдости по глубине для детали, выполненной стали 25XГТ

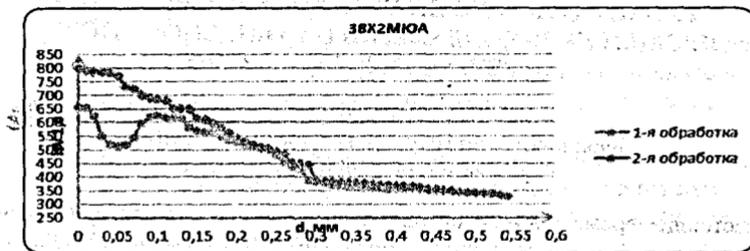


Рисунок 3 – Изменение микротвёрдости по глубине для детали, выполненной стали 38X2МЮА

**Заключение.** Результаты исследования механизма образования диффузионного слоя при ионной ХТО является весьма сложным процессом. Несмотря на практическое использование тлеющего разряда для поверхностного насыщения металлов и сплавов различными элементами, научные представления о взаимодействии газовой среды, активизированной тлеющим разрядом, с поверхностью обрабатываемого материала в полной мере до сих пор не сформированы.

В связи с отсутствием теории этого прогрессивного метода ХТО затруднено понимание особенностей образования поверхностного слоя и управление его структурой, фазовым составом и свойствами. Вследствие этого на недостаточно высоком уровне реализуются широкие потенциальные возможности нового процесса.

Остается спорным вопрос о причинах ускорения процессов ХТО при проведении их в условиях низкотемпературной плазмы тлеющего разряда. Рассмотрение теоретических аспектов ионной ХТО, что является основой разработки теории этого процесса в целом, весьма актуально, как с научной, так и с практической точек зрения. Это позволит в будущем разрабатывать новые научно обоснованные технологические процессы и оборудование для их осуществления. Между тем не вызывает сомнения, что при ИПА следует уделять внимание качеству газов, использовать высокоочищенные газы и чистые баллоны, так как даже малая доля постороннего газа может оказать негативное влияние на качество и свойства упрочнённого слоя.

В результате испытаний было установлено, что в процессе ИПА наличие примеси углекислого газа препятствует упрочнению поверхности на глубине до 0,05 мм на 35%, на глубине от 0,05...0,3 мм на 20...25% и на глубине от 0,3...0,6 мм на 2...6%. Следует более внимательно подходить к заправке баллонов.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Е. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.Р. Панайоти. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1999. – 400 с.
2. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Д.Я. Коган, Г.И. Шпис [и др.]. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.

УДК 621.923.1

### **РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ШЛИФОВАНИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ ГЕЛИКОИДАЛЬНОГО РУБИЛЬНОГО НОЖА. РАЗРЕШАЮЩЕЕ УРАВНЕНИЕ**

*Цуран В.В.*

Барановичский государственный университет,  
Барановичи, Республика Беларусь

В настоящее время для измельчения древесных отходов в щепу применяются специальные рубительные машины типов МРН-10; МРН-30; МРГ-20Б-1; МР2-20Н; МР3-50Н и др. (Россия). По принципиальной конструктивной схеме все существующие типы рубительных машин можно подразделить на два класса – дисковые и барабанные.

В рубительных машинах барабанного типа рабочим инструментом является ножевой ротор (барабан) с закрепленными на нем режущими ножами или резаками. Рабочая поверхность барабана так же может быть профилированной (геликоидальной) и непрофилированной. Барабанные машины обычно имеют большее проходное сечение, чем дисковые, и менее чувствительны к виду измельчаемого сырья, что позволяет перерабатывать в щепу практически весь древесный сортимент - кругляк, отторцовки, горбыль, рейку, обрезки, кривоствольную и даже предварительно раздробленную древесину. Таким образом, основное преимущество барабанной рубительной машины перед дисковой - ее универсальность.

Барабанные рубительные машины по типу подачи сырья подразделяются на машины с принудительной подачей сырья и машины с самоподачей (гравитационный или самозатягивающей). Для измельчения в топливную и технологическую щепу отходов лесопиления и деревообработки из древесины в виде маломерного кругляка (до 200 мм в диаметре) используют рубительные машины типа МРНП-10 [1].

В рубительной машине типа МРНП-10 в качестве режущего инструмента используется нож. В процессе оптимизации технологии измельчения древесных материалов оказался востребованным тип ножа с геликоидальной (криволинейной) поверхностью лезвия (рисунок 1). В качестве направляющей линейчатой поверхности лезвия выбирается ребро  $AB$  заготовки, предназначенное под режущую кромку лезвия, а в качестве базисной плоскости  $P$  - нижняя грань заготовки. Торцевые углы наклона  $\alpha_1, \alpha_2$  установлены опытным путем в процессе эксплуатации машин. Заготовка для изготовления ножа может иметь форму пластины с габаритными размерами ножа или пластины со скошенным под углом  $\alpha_2$  по всей длине краем (полуфабрикат).

Для заточки ножей с наклонной поверхностью лезвия на ОАО «БААЗ» (г. Барановичи) был сконструирован специальный механизм, фрагмент которого показан на рисунке 2. Оснасткой для закрепления ножа служит подвижный цилиндр. На рисунке он изображен в исходном (для рабочего хода) положении; в процессе заострения ножа цилиндр перемещается влево, совершая винтовое движение. Последнее обусловлено наличием в нижней стенке цилиндра винтовой канавки и входящего в нее ролика, неподвижно закрепленного в основании механизма и имеющего возможность вращения вокруг своей оси.

Цилиндр с заготовкой для ножа в дальнейшем будем называть несущим. Заточный круг располагается над несущим цилиндром. Его ось вращения перпендикулярна образующей цилиндра. В процессе заточки ножа она остается неподвижной.

Механизм снабжен ручным приводом. Вращением маховика приводится в движение винт, увлекающий гайку с пальцем, вставленным в отверстие в стенке цилиндра (на рисунке 2 гайка видна на его передней стенке). Вместе с гайкой движется несущий цилиндр.

Заготовка закрепляется на цилиндре таким образом, чтобы ее часть, предназначенная для обработки заточным кругом под острие ножа, выступала над по-

верхностью цилиндра. На рисунке 2 так же схематично показан фрагмент переднего торца несущего цилиндра  $C$  с заготовкой  $E$ .

Буквой  $S$  (рисунок 2) обозначена виртуальная плоскость, параллельная оси цилиндра  $C$  и касательная к нижней поверхности заточного круга  $D$ . Эта плоскость вместе с нижней плоскостью заготовки  $E$  ограничивают заданный угол  $\alpha_1$  заточки лезвия ножа (на рисунке 2 видна проекция  $\alpha'_1$  этого угла на торцевое сечение цилиндра). Срезается (стачивается) та часть заготовки, которая находится выше плоскости  $S$  (на рисунке заштрихована). Поэтому ее можно назвать *плоскостью среза* [2]. Буквой  $s$  на рисунке 2 обозначена относительная траектория конца  $A$  режущей кромки лезвия, касательная к плоскости  $S$ . Геометрическое место траектории  $s$  для всех точек кромки  $AB$  представляет поверхность, описываемую отрезком  $AB$  в относительном движении. Форма этой поверхности, накладывает определенные ограничения на выбор угла деплонации и настройку механизма.

Деплонация скошенной поверхности лезвия в процессе заточки достигается благодаря строго определенному расположению заготовки на несущем цилиндре. Позиция заготовки на цилиндре устанавливается расчетным путем и в основном определяется углом деплонации лезвия. Последний выбирается из условий оптимизации процессов резания в рубительных машинах.

Как видно из рисунка 2, в исходном для рабочего хода положении несущего цилиндра точка  $A$  ребра  $AB$  располагается в апогее ее траектории  $s$ , его конец  $B$  сдвинут от апогея такой же траектории в заднем торце на длину дуги  $A_0B$ , соответствующей центральному углу  $\alpha'_2$  (рисунок 4). В процессе заточки в конце рабочего хода конец  $B$  ребра  $AB$  в относительном движении переносится цилиндром в положение  $A_0$  в плоскость среза.

В рассматриваемой задаче известными параметрами механической системы принимаем  $\alpha_1, \alpha_2, L, \rho_0$ . Необходимо найти  $\alpha'_1, \alpha'_2, L', \beta, \theta$ . Для перехода от заданных величин к искомым установим математические зависимости между ними. Это можно сделать, составив и решив основное (разрешающее) уравнение задачи. В качестве неизвестной разрешающей функции примем  $\cos \beta$ . Для вывода основного уравнения воспользуемся формулой

$$\operatorname{tg} \alpha'_2 = \frac{\cos \beta}{\cos \theta} \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 \quad (1)$$

и геометрическими соотношениями, имеющими место в торце цилиндрической поверхности среза (рисунки 3,4)

$$\frac{a_0}{d_0} = \operatorname{tg} \alpha'_2 \quad (2)$$

$$a_0^2 + d_0^2 = \rho_0^2 \quad (3)$$

Будем так же учитывать, что в формулах (2, 3)

$$a_0 = L \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$d_0 = \rho_0 - c_0 = \rho_0 - L \cdot \sin \beta \cdot \cos \theta \quad (5)$$

Совместное громоздкое преобразование уравнений (1), (2), (3), (4), (5) приводит к разрешающему уравнению вида

$$\cos^{12} \beta + a_1 \cdot \cos^{10} \beta + a_2 \cdot \cos^8 \beta + a_3 \cdot \cos^6 \beta + a_4 \cdot \cos^4 \beta + a_5 \cdot \cos^2 \beta + a_6 = 0$$

Приняв  $\cos^2 \beta = x$ , получим

$$x^6 + a_1 \cdot x^5 + a_2 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^2 + a_5 \cdot x + a_6 = 0 \quad (6)$$

Здесь коэффициенты  $a_1, a_2, \dots, a_6$  являются известными функциями заданных параметров  $\alpha, L, \rho_0$ . Решение уравнения (6) в общем виде не представляется возможным. Задачу можно решить с помощью компьютера, задавшись числовыми значениями параметров.

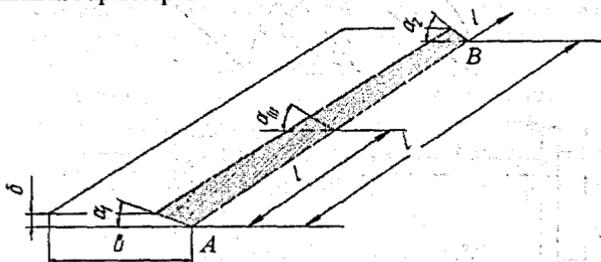


Рисунок 1 – Схема рубильного ножа

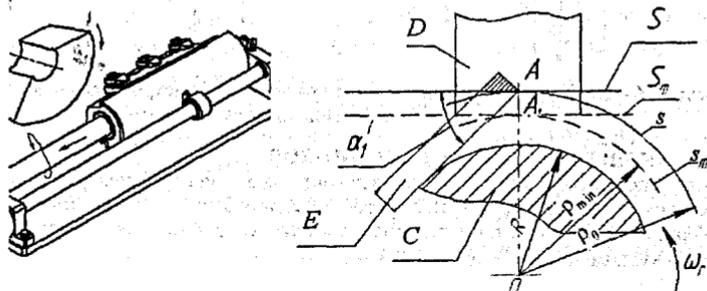


Рисунок 2 – Механизм для заточки режущей кромки рубильного ножа с фрагментом переднего торца несущего цилиндра с заготовкой

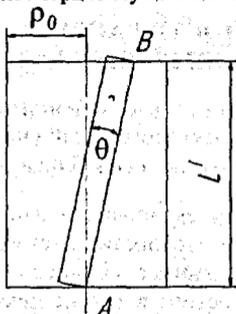


Рисунок 3 – Закрепление заготовки на несущем цилиндре (вид сверху)

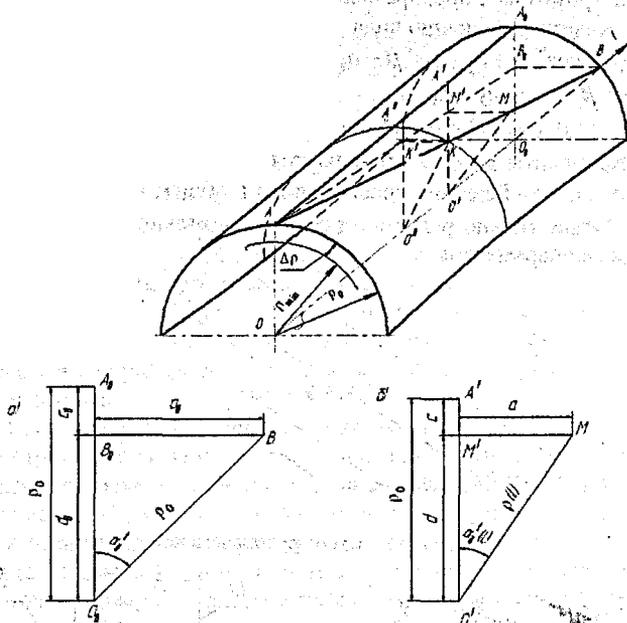


Рисунок 4 – Однополостный гиперболюид вращения с геометрическими фигурами в торцовом и произвольном сечениях

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алифанов, А.В. Устройство для геликоидального шлифования режущего лезвия рубильных ножей / А.В. Алифанов, В.В. Цуран // Вестник БарГУ. – 2013. – Вып.1. – С. 44 – 49.
2. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Москва: изд-во «Наука», 1974. – 831 с.

УДК 621.833

### ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА УРОВНЯ ШУМА ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*Черноус Д.А., Шимановский А.О.*

Белорусский государственный университет-транспорта,  
Гомель, Республика Беларусь

В настоящее время при проектировании машин и механизмов наряду с обеспечением надежности и долговечности конструкции решается задача снижения уровня шума при работе механизма. Один из способов решения подобной задачи для зубчатых передач состоит в замене цельнолитых шестерен на металлополимерные зубчатые колеса [1, 2]. Относительно низкая жесткость зуба в таких колесах позволяет обеспечить многопарное зацепление. При этом существ-

венно снижается ударная сила, действующая на зуб, и, как следствие, уровень шума. Кроме того, выраженные реономные свойства полимерных материалов обуславливают высокий уровень поглощения механической энергии при циклическом нагружении. Данное обстоятельство также приводит к снижению уровня шума при использовании полимеров. До настоящего времени при расчетах виброактивности и уровня шума зубчатых передач не уделяется достаточно внимания учету вязкости материала зуба [2, 3].

Для обеспечения требуемой жесткости и прочности конструкции, содержащей элементы из полимерных материалов, производят армирование полимера волокнами или дисперсными частицами [2]. Наличие наполнителя оказывает существенное влияние на вязкоупругие характеристики композита и, следовательно, на уровень шума при работе механизма. В известных работах [1-3] отсутствует подробный анализ данного влияния.

В связи с вышесказанным, целью настоящей работы является установление зависимости уровня шума при циклическом нагружении деталей из полимерного композита от вязкоупругих характеристик полимера и содержания наполнителя.

В качестве основного показателя уровня шума будем использовать уровень звукового давления  $L$  (дБ)

$$L = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right) = 20 \lg \left( \frac{\rho c}{p_0} v \right). \quad (1)$$

Здесь  $p$  – звуковое давление;  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па – пороговое давление;  $\rho = 1,23$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воздуха при 20°C;  $c = 343$  м/с – скорость звука в воздухе при 20°C;  $v$  – амплитуда виброскорости.

Для определения величины  $v$  необходимо установить временные зависимости упругих смещений в рассматриваемой детали при ее циклическом нагружении.

При анализе вибрации зубчатых колес и других элементов конструкций часто используются упрощенные механические модели [3], содержащие сосредоточенную массу, упругий и вязкий элементы (рисунок 1а). В соответствии с данной моделью упругое смещение  $x$  определяется из решения дифференциального уравнения

$$m\ddot{x} + \alpha\dot{x} + cx = F. \quad (2)$$

Здесь  $m$  – приведенная масса;  $\alpha$  – коэффициент демпфирования;  $c$  – коэффициент жесткости;  $F$  – вынуждающая сила. Величины  $m$ ,  $\alpha$ ,  $c$ ,  $F$  определяются характеристиками используемых материалов, геометрическими параметрами конструкции и действующими в ней силами [3].

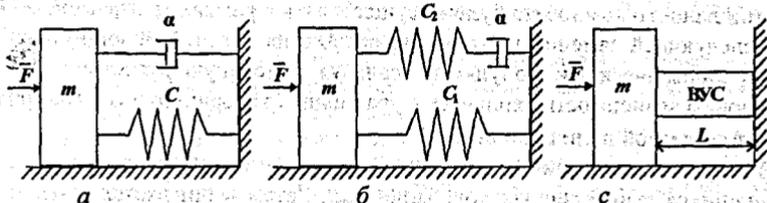


Рисунок 1 – Упрощенные модели вибрации элемента конструкции (пояснения в тексте)

Вместе с тем, простейшая модель деформирования вязкоупругого материала, позволяющая адекватно описать реономные свойства полимера в относительно узком диапазоне температур и частот нагружения, подразумевает использование трех механических параметров: времени релаксации  $\tau$ , длительного  $H$  и мгновенного  $E$  модулей упругости [1]. В соответствии с данной моделью связь осевого напряжения с продольной деформацией при одноосном напряженном состоянии рассматриваемого материала задается дифференциальным уравнением

$$\dot{\sigma} + \frac{1}{\tau}\sigma = E\dot{\epsilon} + \frac{H}{\tau}\epsilon. \quad (3)$$

Если используемый в конструкции материал характеризуется физическим уравнением (3), то упрощенная модель вибрации должна содержать два упругих элемента (рисунок 1б). При этом дифференциальное уравнение для смещения  $x$  будет иметь вид

$$\alpha F + c_2 F = m\alpha\ddot{x} + mc_2\dot{x} + \alpha(c_1 + c_2)\dot{x} + c_1c_2x. \quad (4)$$

В рамках настоящей работы не будем ограничиваться конкретной конструкцией элемента механизма. Для общей оценки влияния вязкоупругих характеристик материала на уровень шума рассмотрим упрощенную модельную задачу, схематически представленную на рисунке 1с. В рассматриваемой системе груз массы  $m$  скреплен с вязкоупругим стержнем (ВУС) длины  $L$  и поперечного сечения  $S$ . Использование сосредоточенной приведенной массы  $m$  позволяет пренебречь плотностью материала стержня. Деформационное поведение этого материала будем описывать физическим уравнением (2). На груз действует гармоническая вынуждающая сила с частотой  $\omega$  и амплитудой  $F_0$ . Для данной системы уравнение (4) можно переписать в виде

$$F_0 \left( \omega \cos(\omega t) + \frac{1}{\tau} \sin(\omega t) \right) = m\ddot{x} + m\frac{1}{\tau}\dot{x} + E\frac{S}{L}\dot{x} + \frac{HS}{\tau L}x. \quad (5)$$

В качестве материала стержня будем рассматривать наполненный дисперсным углеродом политетрафторэтилен [4]. Значения вязкоупругих характеристик полимерной матрицы при температуре  $20^\circ\text{C}$  следующие [4]  $E = 280$  МПа;  $H = 216$  МПа;  $\tau = 33$  мкс. Коэффициент Пуассона  $\nu = 0,495$ . Наполнитель рассматривается как линейно упругий материал с модулем Юнга  $E = 228$  ГПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,25$ . Расчет эффективных вязкоупругих характеристик данного композита будем осуществлять в рамках трехфазной модели [5] с последующей заменой упругих характеристик соответствующими комплексными динамическими модулями. Реализуя описанную расчетную процедуру, установим зависимость входящих в уравнение (5) характеристик материала  $\tau$ ,  $H$  и  $E$  от объемной доли наполнителя  $\phi$ .

В результате решения уравнения (5) определяется значение амплитуды установившихся вынужденных колебаний  $x_{\max}$ . Затем вычисляется входящая в равенство (1) виброскорость  $v = \omega x_{\max}$ .

На рисунке 2 представлены результаты расчета уровня звукового давления по формуле (1) при следующих значениях исходных параметров системы:  $L = 0,3$  м;  $S = 50$  мм<sup>2</sup>;  $m = 20$  г;  $F_0 = 1$  кН;  $\omega = 500$  Гц. Анализ зависимостей на рисунке 2 позволяет сделать вывод о прямо пропорциональной зависимости уровня звукового давления при вибрации в рассматриваемой системе от объемной доли наполнителя. Кроме того, приведенные результаты свидетельствуют о недопустимости пренебрежения вязкостью полимера при расчете уровня шума.

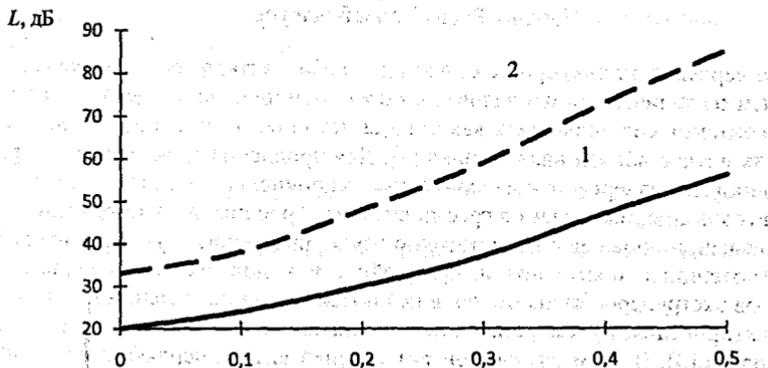


Рисунок 2 — Зависимость уровня звукового давления от объемной доли наполнителя в материале стержня. Кривая 1 — расчет на основе уравнения (5); кривая 2 — пренебрежение вязкостью фторопласта ( $\tau \rightarrow \infty$ )

Таким образом, в работе показано, что при описании вибрации деталей машин, содержащих элементы их полимерных композитов, необходимо составить и решить дифференциальное уравнение третьего (как минимум) порядка для упругих смещений. Для рассмотренного в качестве расчетного примера угленаполненного фторопласта установлено, что уровень шума при вибрации практически линейно возрастает по мере увеличения объемной доли наполнителя. При этом пренебрежение вязкостью матричного материала в композите обуславливает завышенную (порядка 55%) расчетную оценку уровня шума.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белый, В.А. Металлополимерные зубчатые передачи / В.А. Белый, В.Е. Старжинский, С.В. Щербаков — Минск: Наука и техника. — 1981. — 352 с.
2. Шилько, С.В. Двухуровневый метод расчета трибосопряжений из дисперсно-армированных композитов: Часть 2 / С.В. Шилько, В.Е. Старжинский, Д.А. Черноус, Е.М. Петроковец // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 1. — С. 52–61.
3. Ишин, Н.Н. Динамика и вибромониторинг зубчатых передач / Н.Н. Ишин. — Минск: Беларус. навука. — 2013. — 432 с.
4. Ferry, J.D. Viscoelastic properties of polymers / J.D. Ferry. — New York-London, 1961. — 530 p.
5. Кристенсен, Р. Введение в механику композитов / Р. Кристенсен. — М.: Мир. — 1982. — 334 с.

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОПОРЫ НА ДЕФОРМАЦИЮ ИЗГИБА ЧЕРВЯКА ЭКСТРУДЕРА

Барсуков В.Г.<sup>1</sup>, Грахольская Е.В.<sup>1</sup>, Ховатов П.А.<sup>1</sup>, Комар О.В.<sup>2</sup>

1) Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,

2) Гродно, Республика Беларусь;

3) Институт «Гродногражданпроект»,  
Гродно, Республика Беларусь

Работа червяков экструдеров с опорой на гребни витков сопровождается постепенным изнашиванием последних, а также цилиндра экструдера в зоне взаимного контакта, составляющей, как показывает опыт эксплуатации, несколько последних витков вблизи наконечника [1]. Для продления срока службы червяки и цилиндры подвергают поверхностному упрочнению методами азотирования, цианирования, наплавки на гребни витков твёрдосплавных покрытий [1-3]. Значительный, но пока еще недостаточно изученный и конструктивно проработанный потенциал повышения износостойкости и долговечности червяков и цилиндров экструдеров заключается в исключении или ослаблении из взаимного контактирования, путём установки дополнительной опоры в зоне наконечника червяка [3]. В этом случае контакт гребней витков червяка с цилиндром заменяется на контакт устанавливаемой опорной втулки с наконечником, имеющим специально выполненную опорную поверхность. Однако исследования и разработки в этом направлении только начаты. В литературе освещены вопросы деформирования двухопорных червяков постоянного сечения [4]. Применительно к двухопорным червякам переменного сечения соответствующие методики расчета отсутствуют.

Целью исследований является разработка расчетной методики и оценка с её помощью параметров деформированного состояния двухопорных червяков переменного сечения для наиболее опасных с позиций заедания и изнашивания условий нагружения (отсутствие перерабатываемого материала а соответственно, и смазки в рабочей зоне).

Расчетная схема модернизированной конструкции червяка при отсутствии материала в межвитковом пространстве может быть представлена в виде консоли закрепленной статически неопределимой балки переменного сечения, имеющей продольную полость для подвода охлаждающей жидкости. Балка нагружена меняющейся по длине распределенной нагрузкой от собственного веса.

На конце балки предусмотрен радиальный зазор  $\delta_0$  между опорной поверхностью наконечника червяка и втулки (рис. 1).

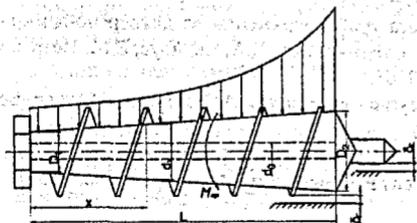


Рисунок 1 – Расчетная схема двухопорного червяка переменного сечения

При расчетах за основу принято дифференциальное уравнение изогнутой оси балки переменного сечения в виде

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[ \frac{EI_x d^2 y}{dx^2} \right] = q(x) \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости материала червяка;  $I_x$  – момент инерции сечения червяка в данной точке, расположенной на расстоянии  $x$  от консольного защемления;  $y$  – величина прогиба червяка в точке с координатой  $x$ .

Учитываем, что сечение сердечника червяка круглое и имеет полость для охлаждающей жидкости. Тогда

$$I_x = \frac{\pi r_x^4 (1 - \alpha^4)}{4}, \quad (2)$$

$$q(x) = \rho g \pi r_x^2 (1 - \alpha^2), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – отношение диаметра полости к наружному диаметру червяка в данном сечении.

При этом текущее значение внешнего радиуса  $r_x$  в точке с координатой  $x$  равно

$$r_x = R_1 + \frac{R_2 - R_1}{L} x = R_1 + Kx, \quad (4)$$

где  $K = \frac{R_2 - R_1}{L}$ .

В результате решения дифференциального уравнения (1) получена функция прогибов оси червяка

$$y = \frac{\rho g}{6E(1 - \alpha^2)K^4} r_x^2 + \frac{2C_1}{\pi E(1 - \alpha^4)} \frac{1}{r_x} + \frac{C_2}{3\pi E(1 - \alpha^4)} \frac{1}{r_x^2} + C_3 r_x + C_4. \quad (5)$$

Для определения постоянных интегрирования  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_4$  воспользуемся следующими граничными условиями:

- прогиб червяка и угол наклона его изогнутой оси в точке консольного закрепления равен нулю ( $y_{R_1} = 0$ ;  $y'_{R_1} = 0$ );
- перемещение червяка в точке дополнительной опоры равно зазору  $\delta$  между наконечником червяка и опорной поверхностью втулки  $y_{R_2} = \delta$ ;
- изгибающий момент на конце червяка равен нулю, т.е.  $y''_{R_2} = 0$ .

Выполнение этих граничных условий дает систему из четырех уравнений, решив которые, находили постоянные интегрирования.

Проанализировано влияние размеров червяка и зазоров в сопряжении наконечник червяка-втулка дополнительной опоры на функцию прогибов оси червяка экструдера и условия возникновения промежуточного межопорного максимума. Определены условия возникновения, место расположения точки промежуточного максимума прогиба и его значения для ряда типоразмеров червяков экструдеров. Предложены рекомендации по назначению величин зазоров в сопряжении с целью исключения возможности промежуточного касания червяка с цилиндром.

Полученные результаты могут быть использованы при расчете и конструировании новых экструдеров, а также для модернизации существующих для продления срока их эксплуатации.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стамбурский, Е.А. Износ оборудования при переработке пластмасс / Е.А. Стамбурский, А.И. Бейль, В.П. Карливан, Ю.А. Беспалов. – М.: Химия, 1985. – 208 с.
2. Зверлин, В.Г. Проблемы повышения эксплуатационной стойкости червяков и цилиндров экструзионного оборудования / В.Г. Зверлин, А.Н. Гладченко, В.В. Сазонов. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1980. – 46 с.
3. Экструдер для переработки полимерных материалов: пат. 3906 Респ. Беларусь, МПК В29С47/00 / В.Г. Барсуков, Е.В. Грахольская, А.И. Свириденко ; заявители: НИЦ ПР НАН Беларуси и Гродн. гос. ун-т. – № 20070137, заявл. 22.02.07; выдан 30.10.07.
4. Барсуков, В.Г. Увеличение износостойкости и транспортирующей способности рабочих органов экструдера путем модернизации конструкции / Е.В. Грахольская, В.Г. Барсуков // Трибофатика - Tribo-fatigue: Трибофатика: труды VI Международного симпозиума по трибофатике МСТФ 2010. – Минск: 25 окт. – 1 нояб. 2010: в 2 ч. / редкол: М.А.Журавков (пред.). – Минск: БГУ, 2010. – Ч. 1. – С. 485-492.

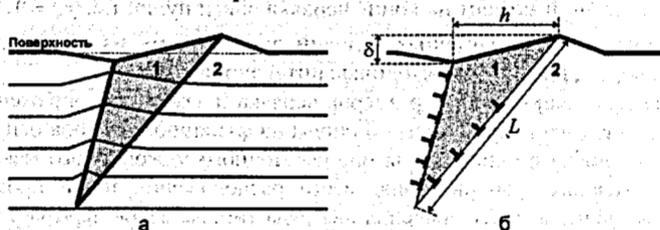
УДК 621.914.1

## ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ДИСЛОКАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СДВОЙНИКОВАННОЙ ОБЛАСТИ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ СКАНИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

*Чикова Т.С., Ховатов П.А.*

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,  
Гродно, Республика Беларусь

Пластическая деформация двойникованием сопровождается поворотом кристаллической решетки, что всегда приводит к образованию характерного рельефа на поверхности материала. В зависимости от интенсивности силового воздействия и стадии развития пластичности сдвойникованные области представляют собой клиновидные или плоскопараллельные прослойки [1]. Из-за того, что при повороте сдвойникованной части объема кристалла две границы двойника находятся на разном уровне относительно поверхности – одна опущена, а другая поднята (рис. 1а) – механические двойники можно наблюдать в отраженном свете в оптическом микроскопе.



1 – двойниковая прослойка; 2 – основной кристалл;  $L$  – длина двойника;  
 $h$  – толщина двойника;  $\delta$  – высота ступеньки на поверхности кристалла  
Рисунок 1 – Клиновидный механический двойник в кристалле (а),  
дислокационная модель клиновидного двойника (б)

Деформация двойникующихся металлов, как правило, осуществляется одновременно двумя основными видами дислокационной пластичности – скольжением и двойникованием. Скольжение происходит путем перемещения полных дислокаций с вектором Бюргерса, кратным величине параметра решетки кристалла, а двойникование – за счет движения частичных двойникующих дислокаций с вектором Бюргерса, составляющим часть параметра решетки. Основное различие между полными и двойникующими дислокациями состоит в том, что в одной и той же кристаллографической плоскости может одновременно находиться несколько полных дислокаций, а двойникующая дислокация в каждой кристаллографической плоскости всегда только одна.

В настоящее время экспериментально и теоретически обоснована следующая дислокационная модель клиновидной двойниковой прослойки [2]. Двойниковый клин – это часть объема кристалла, в котором начато, но не окончено двойникование. В каждой кристаллографической плоскости сдвойникованной области находится одна двойникующая дислокация. Ансамбль двойникующих дислокаций, образующий двойник, расположен по контуру прослойки (рис. 16). Вся деформация двойникованием сконцентрирована только на границах и в вершине прослойки. Двойник и матрица кристалла имеют одну и ту же кристаллическую решетку, повернутую друг относительно друга на определенный угол, зависящий от величины вектора Бюргерса двойникующей дислокации, который задает высоту  $\delta$  ступеньки, образующейся на поверхности (рис. 16).

Очевидно, что границы и вершина клиновидного двойника являются местами концентрации напряжений в твердом теле. Для оценки прочности сдвойникованного металла необходимо знать количественные параметры ансамбля двойникующих дислокаций, образующих двойниковый клин, и закономерности распределения их вдоль двойниковых границ – границ раздела в материале.

Разрешение оптического микроскопа позволяет вполне удовлетворительно изучать формы и размеры сдвойникованных областей материала на микроуровне, однако с его помощью нельзя получить какие-либо точные данные для количественного анализа дислокационных характеристик двойниковых прослоек. Такие возможности дает изучение рельефа поверхности сдвойникованного металла методом атомной силовой микроскопии (АСМ), который позволяет получать трехмерные изображения топографических особенностей поверхности образцов в нанометровом диапазоне.

В работе изучены деформационные двойники, полученные путем индентирования плоскости спайности монокристалла цинка четырёхгранной алмазной пирамидкой на автоматическом микротвердомере HWMТ-Х7. Отпечатки индентора и образовавшиеся вокруг них клиновидные двойники исследовались с помощью атомно-силового микроскопа АСМ «NT-206» со стандартными кремниевыми кантилеверами CSC-37, CSC-38 и с разрешением по вертикали 0,2 нм и по горизонтали 2,0 нм. Определены длина и толщина клиновидного двойника, а также высота ступеньки на поверхности кристалла в девяти сечениях прослойки вдоль ее длины (рис. 2, таблица 1).

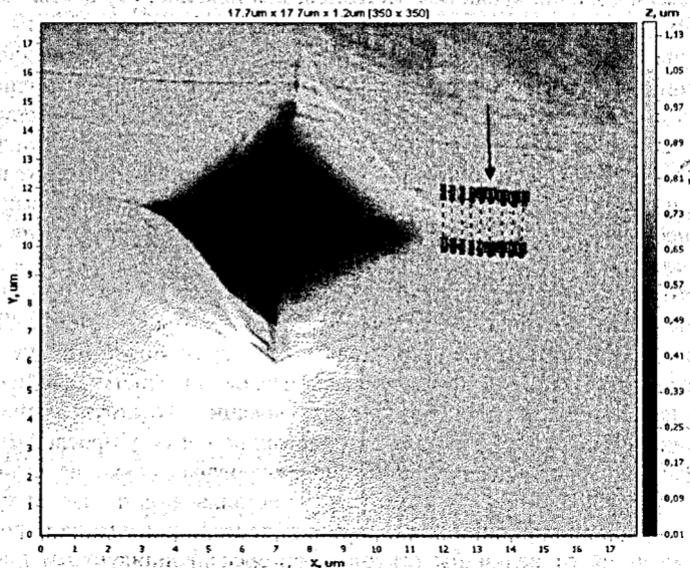


Рисунок 2 – Топография отпечатка индентора с двойниками в монокристалле цинка (стрелкой указан исследованный двойник с сечениями).

Таблица 1 – Размеры клиновидного двойника в сечениях

Номер сечения	L, мкм	h, мкм	δ, нм
1-2	0	0,58	37,8
3-4	0,28	0,52	32,0
5-6	0,52	0,48	26,0
7-8	0,84	0,44	18,9
9-10	1,16	0,35	13,6
11-12	1,45	0,31	12,9
13-14	1,80	0,29	7,5
15-16	2,12	0,27	5,7
17-18	2,44	0,19	2,5
	3,50	-	-

Где L – длина двойника; h – толщина двойника; δ – высоты ступеньки на поверхности кристалла.

Полученные результаты позволяют вычислить количественные параметры ансамбля двойникующих дислокаций, образующих двойник. Полное число двойникующих дислокаций в ансамбле N можно определить из соотношения:

$$N = \frac{h}{a} = \frac{\delta}{b},$$

где a – параметр кристаллической решетки цинка в направлении  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ , b – вектор Бюргерса двойникующей дислокации в цинке, h и δ – значения толщины двойника и высоты ступеньки на поверхности у устья двойника.

По измеренным значениям  $h$  и  $\delta$  для разных сечений двойника можно найти угол наклона сдвойникованной части кристалла к поверхности образца  $\alpha$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta}{h}$$

и плотность двойникующих дислокаций на границе  $\rho$  в каждом сечении

$$\rho = \frac{h}{aL}$$

Неравные приращения толщины двойника  $\Delta h$  в различных сечениях (табл. 1) свидетельствуют о неравномерности распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах. Места их скопления вызывают наибольшие концентрации напряжений в кристалле.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Классен-Неклюдова, М.В. Механическое двойникование кристаллов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 261 с.
2. Косевич, А.М. Дислокационная теория упругого двойникования кристаллов / А.М. Косевич, В.С.Бойко // Успехи физических наук. – 1971. – Т. 104. – № 2. – С. 201-254.

УДК 539.8:548.24

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ КУЛАЧКОВ ТОКАРНОГО ПАТРОНА

*Наскевич В.Ю., Казьмин А.А., Мишкель Е.В.*

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,  
Гродно, Республика Беларусь

**Введение.** В машиностроении для механической обработки деталей активно используется многолезвийный режущий инструмент – фрезы. Операция фрезерования наиболее часто используется для обработки плоских и сложных поверхностей.

Фрезерование является одним из наиболее распространенных методов обработки. По уровню производительности фрезерование превосходит строгание и в условиях крупносерийного производства уступает лишь наружному протягиванию. Одним из вариантов увеличения производительности обработки является увеличение скорости съема металла с поверхности заготовки. Однако высокие скорости резания при фрезеровании вызывают рост температуры в зоне обработки, что в свою очередь приводит к преждевременному износу режущего инструмента. Замена устаревшего инструмента более прогрессивным способом, а также оптимальный выбор режимов обработки, могут значительно улучшить условия обработки.

**Цель работы.** Целью работы является увеличение производительности получения ступеней кулачков токарного патрона с помощью применения фрезы 6N TF90-11125-40R-09, подбором оптимальных режимов обработки. А также определения стойкости инструмента по базовому и предлагаемому варианту.

**Материалы и методы исследований.** Инструмент по базовому варианту:

Фреза торцевая 2214-0417 [1], оснащенная пластиной КНТ16. Количество режущих кромок на пластине – 8. Количество режущих зубьев – 8. Состав пластины: безвольфрамовый твердый сплав на основе карбонитрида титана Ti(NC). Применяются для фрезерования конструкционных сталей и чугунов.

Предложенная альтернатива, фреза Mill Rush модели: 6N TF90-11125-40R-09 оснащенная режущими пластинами: 6NGU 090508R-M. Количество режущих кромок на пластине – 6. Количество режущих зубьев – 11. Материал режущей части – твердый сплав ТТ9080 [2].

В ходе проведения испытаний использовался фрезерный вертикальный консольный станок с ЧПУ и АСИ – ГФ2171. Технические характеристики станка приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики станка

Наименование параметров	Данные
Размеры рабочей поверхности стола, мм	400x1600
Наибольшая масса детали, устанавливаемой на столе станка (вместе с приспособлением), кг	400
Пределы частот вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	50...2500

Кулачок является элементом токарного патрона и служит для закрепления обрабатываемой детали за наружную поверхность для вала или за внутреннюю поверхность отверстия в заготовке. Схема обработки представлена на рисунке 1.

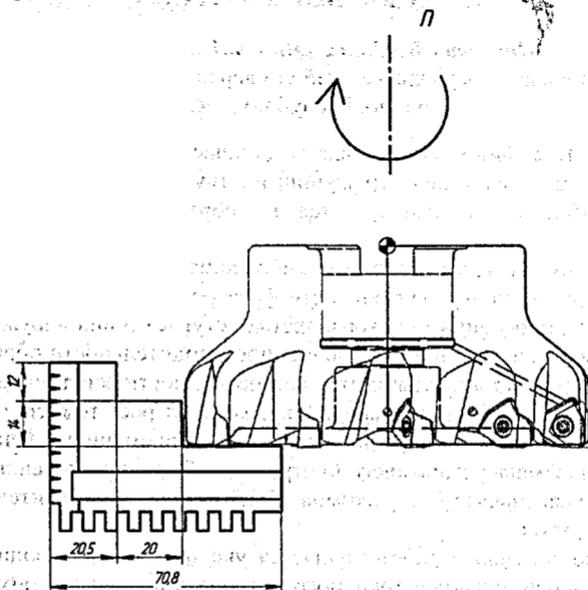


Рисунок 1 – Схема обработки

Исходные данные: Обрабатываемый материал: Сталь 40X ГОСТ 4543-71. Химический состав материала в % : С 0,36 - 0,44; Si 0,17 - 0,37; Mn 0,5 - 0,8; Ni до 0,3; S до 0,035; P до 0,035; Cr 0,8 - 1,1; Cu до 0,3; Fe-97[3].

Основным критерием данного выбора как альтернативного послужила режущая пластина. Особенности этой пластины являются: 1- она имеет шесть режущих кромок и оснащена Wiper – геометрией, 2 – система крепления пластин на фрезе практически исключает их преждевременную поломку при правильном подборе марки сплава и режимов резания, а значит, позволяет быть уверенными, что в процессе обработки будут участвовать все шесть кромок [2].

**Результаты и обсуждение.** Важным критерием оценки эффективности использования фрезы является ее стойкость. Режимы фрезерования по базовому варианту установлены согласно методическим рекомендациям [4] и альтернативному варианту обработки, руководствуясь рекомендациями производителя [2]. Принятые параметры обработки и основные данные по инструменту представлены в таблице 2. Время на обработку принято со стойки системы ЧПУ (таблица 2).

Таблица 2 – Режимы фрезерования торцевой фрезой 125

Данные	Альтернативный вариант	Базовый вариант
Инструмент	Фреза 6N TF90-11125-40R-09	Фреза торцевая 2214-0417
Пластина	6NGU 090508R-M	KHT16
Сплав	TT9080	
Скорость резания, м/мин	140	140
Частота вращения, об/мин	350	350
Подача на зуб, мм/зуб	0,11	0,025
Подача минутная, мм/мин	450	70
Глубина резания, мм	3,5	3,5
Ширина резания, мм	35	35
Число зубьев, шт	11	8
Диаметр инструмента, мм	125	125
Количество режущих кромок на пластине, шт	6	8
Машинное время, мин	3,1 (обработка 6 кулачков)	16,2 (обработка 6 кулачков)
Количество деталей на одну режущую кромку	300	40
Машинное время обработки 1000 деталей, часов	8,7	45

Скорости резания и частота вращения по базовому варианту и альтернативному неизменны, так же не изменились глубина и ширина резания. Фреза 6N TF90-11125-40R-09 состоит из одиннадцати режущих пластин, которые являются двусторонними треугольной формы с шестью режущими кромками. В свою очередь фреза торцевая 2214-0417 оснащена восемью двусторонними четырехгранными режущими пластинами с восемью режущими кромками. Альтернативный вариант с применением пластин 6NGU 090508R-M позволяет значительно увеличить подачу на зуб и минутную подачу в 4,4 раза и 6,4 раза соответственно, что значительно сократило машинное время и время обработки партии деталей. Так же следует отметить, что стойкость фрезы по альтернативному варианту превышает стойкость фрезы по базовому варианту в 7,5 раз.

**Заключение.** Оптимальные параметры обработки должны обеспечивать максимальную стойкость инструмента и наибольшую производительность. Руководствуясь данными исследований, были сформулированы следующие выводы:

1. Оптимальные режимы обработки фрезой 6N TF90-11125-40R-09 составляют  $V = 140$  м/мин,  $f_z = 0,11$  мм/зуб,  $S = 450$  мм/мин.

2. Использование фрезы 6N TF90-11125-40R-09 позволило увеличить подачу, что значительно повлияло на производительность процесса фрезерования. Машинное время обработки партии деталей (1000 штук) было увеличено в 5,4 раза.

3. Стойкость фрезы 6N TF90-11125-40R-09 превышает стойкость фрезы торцевой 2214-0417 по базовому варианту в 7,5 раз.

Внедрение прогрессивного инструмента позволяет в разы увеличить производительность обработки и подтверждает актуальность проведенных исследований по оптимизации технологических процессов.

Рассмотренная технология обработки кулачка токарного патрона является типовой. Данные результаты исследования могут быть использованы в области обработки металлов резанием для фрезерования плоских и ступенчатых деталей машин.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фрезы торцевые с механическим креплением многогранных пластин. Типы и основные размеры: ГОСТ 26595-85. – М.: Изд-во «Стандарт-информ», 2010.

2. Фрезерование. Фрезы и комплектующие к ним. Руководство по использованию: Каталог. – «TaeguTec». 2013. – 214 с.

3. Поковки из конструкционной углеродистой и легированной стали. Общие технические условия: ГОСТ 8479-70. – М.: Изд-во «стандарт», 1986.

4. Барановский, Ю.В. Режимы резания металлов: справочник. – Изд. 3-е, переработанное и дополненное. – М.: Машиностроение, 1972.

УДК 621.73

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ НИКЕЛИДА ТИТАНА С НАНЕСЕННЫМ БАРЬЕРНЫМ СЛОЕМ НИТРИДА ТИТАНА

*Рубаник В.В.<sup>1,2</sup>, Багрец Д.А.<sup>2</sup>, Новигов В.Ю.<sup>1</sup>*

1) Витебский государственный технологический университет  
Витебск, Республика Беларусь

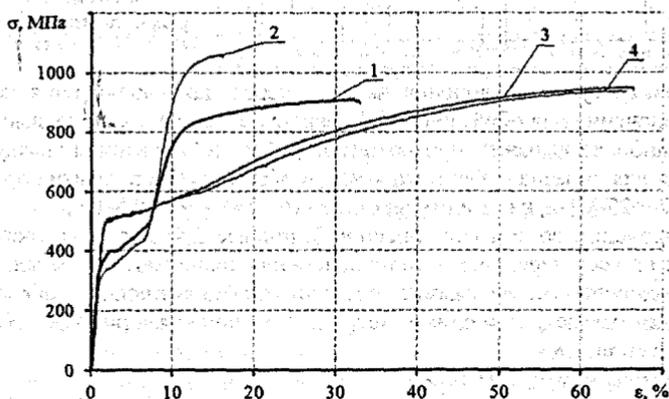
2) Институт технической акустики НАН Беларуси  
Витебск, Республика Беларусь

Сегодня сплавы на основе никелида титана (TiNi) являются перспективными материалами медицинского назначения. Основной помехой для массового внедрения никелида титана в медицину является выход из материала на поверхность ионов никеля (Ni), которые оказывают токсическое воздействие на живые ткани [1-3]. Уменьшить диффузию ионов металла в окружающую среду можно за счет нанесения барьерного слоя на поверхность сплава никелида титана методом ионно-плазменного осаждения [4]. Наиболее изученными являются пленки нитрида титана (TiN), традиционно используемые в качестве защитно-декоративных, упрочняющих и износостойких покрытий.

Целью работы являлось исследование процесса волочения проволоки никелида титана с нанесенным методом ионно-плазменного осаждения тонким барьерным слоем нитрида титана.

В качестве образцов использовали проволоку TiNi эквиаत्मного состава диаметром 0,6 мм. Покрытия из нитрида титана наносили методом ионно-плазменного осаждения на установке «Булат-6», оснащенной сепаратором плазменного потока, при условии вращающегося подложкодержателя. Перед загрузкой в вакуумную камеру образцы подвергали ультразвуковой очистке в среде Нефрас С2-80/120. Нанесение TiN покрытий осуществляли при токе дуги 110 А, напряжении смещения на подложке 100 В, давлении азота 0,3 Па. Время напыления составляло 15 минут, что обеспечивало толщину пленки  $0,8 \pm 1$  мкм. По окончании процесса образцы охлаждали в вакуумной камере до  $100^\circ\text{C}$ .

В результате ионно-плазменного осаждения покрытия из TiN на поверхность никелида титана происходит изменение свойств основы, выражающееся в уменьшении величины фазового предела текучести с 400 МПа до 350 МПа (рисунок 1). При этом предел прочности образца с покрытием (рисунок 1, кривая 1) выше по сравнению с TiNi проволокой в условиях поставки (рисунок 1, кривая 1).



1 – в условиях поставки; 2 – с TiN покрытием; 3 – после рекристаллизационного отжига; 4 – с TiN покрытием после рекристаллизационного отжига

Рисунок 1 – Диаграммы растяжения TiNi проволоки

В работе [5] было показано, что процесс осаждения TiN покрытий приводит к существенным изменениям кинетики мартенситных превращений в никелиде титана, т.е. после напыления TiNi сплав имеет отличные от состояния поставки характеристические температуры, фазовый состав и, как следствие, физико-механические свойства (рисунок 2, кривые 1,2). Поэтому TiNi проволоку в условиях поставки и после осаждения TiN покрытия подвергли рекристаллизационному отжигу при  $700^\circ\text{C}$  в течение 20 мин с закалкой на воздухе. Для исключения окисления поверхности образцов нагрев, выдержку и охлаждение осуществляли в среде аргона.

В результате были получены образцы, имеющие одинаковое фазовое состояние (рисунок 2, кривые 3,4) и механические характеристики (рисунок 1, кривые 3,4), для которых проводились измерения усилий волочения по маршрутам: 0,6 → 0,57 → 0,52 с единичными обжатиями 9,7% на первом переходе и 16,7% на втором; 0,6 → 0,52 с обжатием 25%. Скорость волочения составляла 20 мм/мин, в качестве смазки использовали масло М-8.

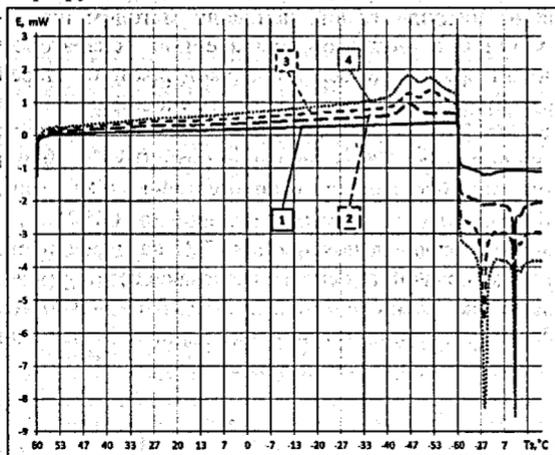


Рисунок 2 – Калориметрические зависимости:

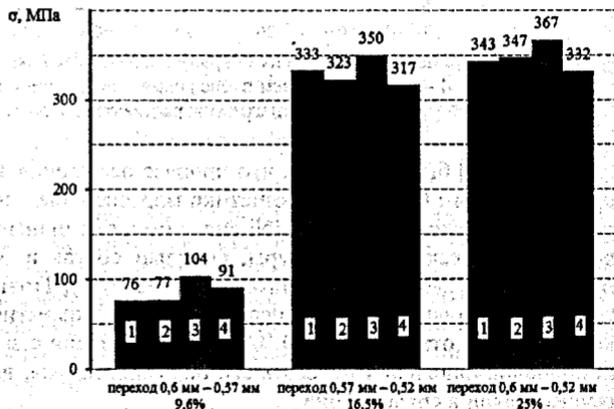
- 1 – в условиях поставки; 2 – с TiN покрытием; 3 – после рекристаллизационного отжига; 4 – с TiN покрытием после рекристаллизационного отжига

В условиях сухого волочения на всех переходах наблюдается повышение усилия волочения для образцов с TiN покрытием (рисунок 3) кривые 1,3). Этот эффект наиболее выражен при обжатиях 9,7 и 25 %. Разница между усилием волочения для образца с TiN покрытием и образцом без покрытия при этом составляет 24÷27 МПа, на втором переходе (16,7 %) – 16÷18 МПа.

При волочении со смазкой (рисунок 3, кривые 2,4) для TiNi проволоки без покрытия на всех переходах усилия волочения совпадают (в пределах погрешности измерения) со значениями, полученными без смазки. Для образцов с TiN покрытиями наблюдается снижение усилий волочения, при этом для больших обжатий усилия волочения ниже, чем у образцов без покрытия.

- 1 – TiNi, без смазки;
- 2 – TiNi, со смазкой;
- 3 – TiNi+TiN, без смазки;
- 4 – TiNi+TiN, со смазкой

Рисунок 3 – Диаграмма напряжений волочения TiNi проволоки для различных переходов



**Вывод.** Таким образом, исследование процесса волочения TiNi проволоки после отжига и с осажденным TiN покрытием показало, что без смазки на всех переходах усиления волочения меньше у образцов без покрытия. Присутствие смазки существенно снижает усилие волочения для образцов с покрытием, достигая наибольшего эффекта при максимальном обжатии – 25%.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ryhanen J. // *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*. – 2000. – Vol. 9. – P. 99-107.
2. Гюнтер, В.Э. // *Российский вестник дентальной имплантологии* / В.Э. Гюнтер, М.З. Миргазизов. – 2004. – № 1. – С. 52-56.
3. Лотков, А.И. // *ФММ* / А.И. Лотков, Л.Л. Мейснер, В.Н. Гришков. – 2005. – Т. 99, № 5. – С. 66-78.
4. Yongqing Fu, Hejun Du, Sam Zhang // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 167. – P. 129-136.
5. Клубович, В.В. // *Материалы, технологии, инструменты* / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., Д.А. Багрец, С.Н. Милюкина, В.Г. Дородейко. – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 47-51.

УДК620.179.1.05

### КОНТРОЛЬ ПРОТЯЖЕННЫХ TiNi ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

*Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Лесота А.В.*

Институт технической акустики НАН Беларуси,

Витебск, Республика Беларусь;

Витебский государственный технологический университет,

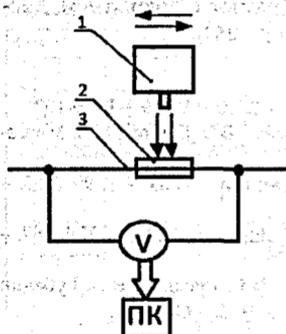
Витебск, Беларусь

В настоящее время широкое практическое применение в различных отраслях науки и техники находят сплавы с термоупругими фазовыми превращениями, в том числе на основе титана и никеля. В связи с этим представляется актуальным разработка методов и устройств контроля однородности физико-механических свойств протяженных, например проволочных, TiNi изделий.

В основу разработанного метода контроля положены результаты экспериментальных исследований по наведению термокинетической ЭДС в сплавах TiNi при обратном фазовом превращении [1,2]. Одной из причин возникновения термокинетической ЭДС является протекание фазовых превращений, которые в сплавах с эффектом памяти формы, например никелиде титана, могут осуществляться при невысоких температурах [2].

Исследования проводили на проволочных образцах Ti-49,77at.% Ni, диаметром 0,25 мм, предварительно отожженных при температуре 700°C в течение двадцати минут и закаленных в воде. Характеристические температуры мартенситных переходов, определенные по температурным зависимостям теплового потока методом дифференциальной сканирующей калориметрии на DSC822° (METTLER TOLEDO), составили:  $M_n = -21^\circ\text{C}$ ,  $M_k = -30^\circ\text{C}$ ,  $A_n = -9^\circ\text{C}$ ,  $A_k = -1^\circ\text{C}$ .

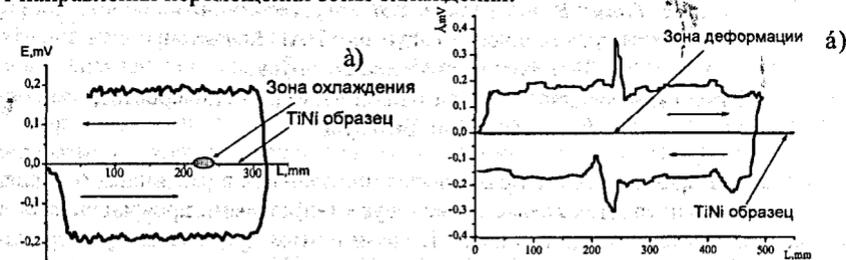
TiNi образцы длиной 420 мм закрепляли на специальной установке (рис.1), позволяющей перемещать их со скоростью 2,5 мм/с. В процессе перемещения образца проводили охлаждение фиксированной зоны жидким азотом до температуры, заведомо меньшей  $M_k$ . В результате, в этой зоне охлаждения происходил прямой фазовый переход  $A \rightarrow M$ . Места контакта образца с подводящими проводами термоизолировали, сигнал с милливольтметра выводили на персональный компьютер.



- 1) устройство для охлаждения 2) область охлаждения  
3) проволоочный образец

Рисунок 1 – Структурная схема измерительной установки

В результате исследования установлено, что в низкотемпературных сплавах TiNi при прямом фазовом превращении в процессе перемещения зоны охлаждения с температурой ниже  $M_k$  вдоль проволоочного образца с постоянной скоростью возникает устойчивая термокинетическая ЭДС (рис.2). Величина наведенной термокинетической ЭДС находится в интервале от 0,17 до 0,21 мВ (рис.2 а). Знак наведенной термокинетической ЭДС зависит от направления перемещения зоны охлаждения.



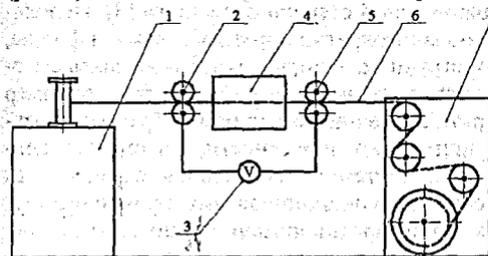
Стрелками указано направление перемещения зоны охлаждения: а) без предварительной деформации образца; б) образец локально деформирован изгибом

Рисунок 2 – Зависимость величины термокинетической ЭДС от местоположения зоны охлаждения в протяженном TiNi образце

В исследовании также рассматривалось влияние деформированных участков проволоки на значение наведенной термокинетической ЭДС. Образец никелида титана как и в первом случае, перемещали с постоянной скоростью 2,5 мм/с, последовательно в двух направлениях при этом в фиксированной зоне охлаждения протекал прямой фазовый переход. Образец TiNi предварительно локально деформировали изгибом. В результате исследований было установлено, что в месте деформации значение термокинетической ЭДС резко возрастает до 0,37 мВ (рис.2 б). Если в образце создать несколько деформированных участков, то при перемещении зоны охлаждения вдоль каждого из них наблюдается увеличение значения термокинетической ЭДС.

На основании данных исследований разработан метод и устройство определения неоднородных участков протяженных изделий TiNi, находящихся в высокотемпературном аустенитном состоянии. Метод определения неоднородных деформационных участков заключается в протягивании протяженного TiNi изделия с постоянной скоростью через устройство, в котором оно локально подвергается охлаждению ниже температуры перехода материала в мартенситное состояние, с непрерывным измерением термокинетической ЭДС, возникающей в проволоке. В случае существования неоднородных участков в проволочном образце наблюдается резкий скачок значения термокинетической ЭДС. Таким образом, по изменению термокинетической ЭДС определяются участки изделия, в которых фазовый или химический состав отличается от заданного, а значит, эти участки отличаются и физическими свойствами и подлежат выбраковке.

На основе полученных экспериментальных данных разработано устройство (рис. 3), состоящее из подающего и принимающего блоков 1 и 7, термостатной



камеры 4 и вольтметра 3 с двумя роликовыми контактами к нему 2 и 5, подключающимися к изделию из никелида титана 6.

Рисунок 3 – Устройство для контроля качества протяженных TiNi изделий

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рубаник, В.В. // Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., О.А. Легкоступов, А.В. Лесота. – Витебск, 2014. – С. 33-35.
2. Рубаник, В.В. // Письма о материалах / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., О.А. Петрова-Буркина. – Уфа, 2012. – Т.2, №2. – С. 71-73.

УДК 621.646.2

### ЗАПОРНЫЙ КЛАПАН С TiNi ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

*Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Непомнящая В.В.*

Институт технической акустики НАН Беларуси,

Витебск, Республика Беларусь;

Витебский технологический университет,

Витебск, Республика Беларусь

В настоящее время широкое практическое применение в различных отраслях промышленности находят сплавы, проявляющие эффект памяти формы, в частности, изделия с TiNi элементами. Работа их основана на проявлении эффекта сверхупругости или эффекта памяти формы (ЭПФ). Эффект памяти формы — способность восстанавливать исходную форму при нагреве через интервал мартенситных превращений после предварительного деформирования в низкотемпературной мартенситной фазе [1].

На сегодняшний день известно уже более десятка сплавов с памятью формы на базе разных элементов. Однако семейство нитиноловых остается самым распространенным. В них четко выражен эффект памяти формы, причем диапазон температур можно с хорошей точностью регулировать; вводя в сплав различные примеси. В стесненных условиях, когда свободный возврат деформации запрещен, элементы из сплавов с ЭПФ при нагреве в интервале мартенситного превращения развивают реактивные напряжения до 600–700 МПа, что на порядок превосходит уровень напряжений, генерируемых обычными материалами при нагреве в том же температурном интервале.

Элементы из сплавов с памятью формы на основе никелида титана способны в узком температурном интервале от 5 до 40 °С восстанавливать предварительно заданные однократные и обратимые деформации [2].

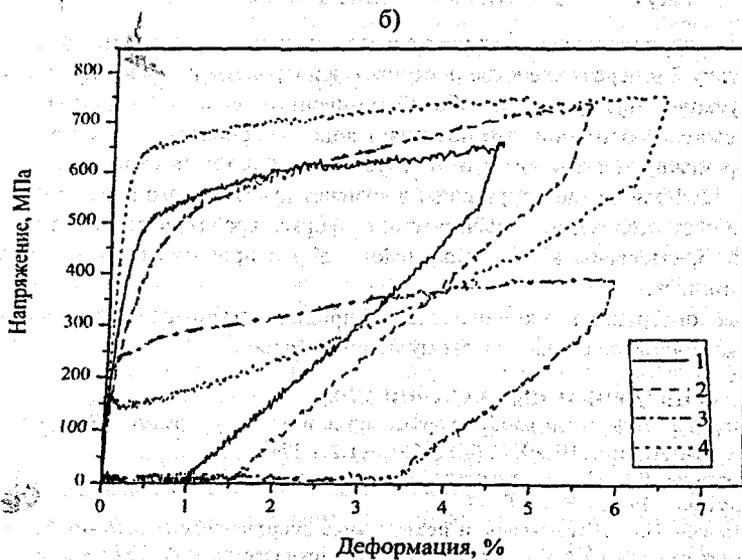
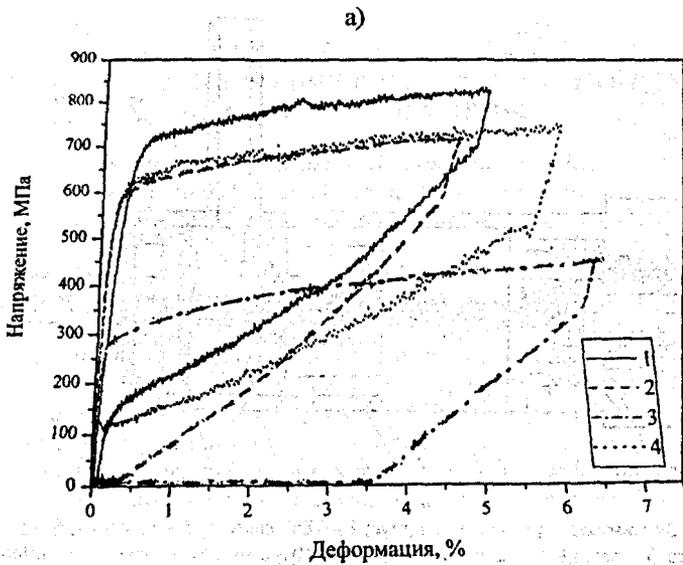
Металл, обладающий способностью к возврату деформаций, можно запрограммировать на довольно сложные движения и тем самым на совершение исполнительных функций почти неограниченной степени сложности [3]. Используя способность металла к проявлению многократно обратимой памяти формы, легко сделать трансформируемые конструкции, которые будут совершать саморазвертывание и самосборку, а отдельные исполнительные элементы, например пружины, будут многократно повторять движения самых разнообразных траекторий. Такие элементы аппаратуры применяют, в частности, в элементах контрольно-исполнительных механизмов в системах обеспечения безопасности различных технологических процессов и функционирования промышленных помещений (разъединители токовых сетей, противопожарные сигнальные системы и исполнительные элементы систем пожаротушения, сигнально – исполнительные элементы противопожарных и предохранительных клапанов в системах вентиляции) [4].

В настоящей работе приведена конструкция разработанного запорного клапана с TiNi исполнительным элементом, регулирующего поступление воды и срабатывающего при достижении определенной критической температуры.

За счет TiNi элемента разработанный запорный клапан уменьшает подачу воды, если критическая температура воды достигнет  $48 \pm 50$  °С. Он может использоваться для монтажа и модернизации различных смесителей и душевых. Преимущество данного клапана заключается в быстрой и простой установке, совместимости с большинством кранов и душами.

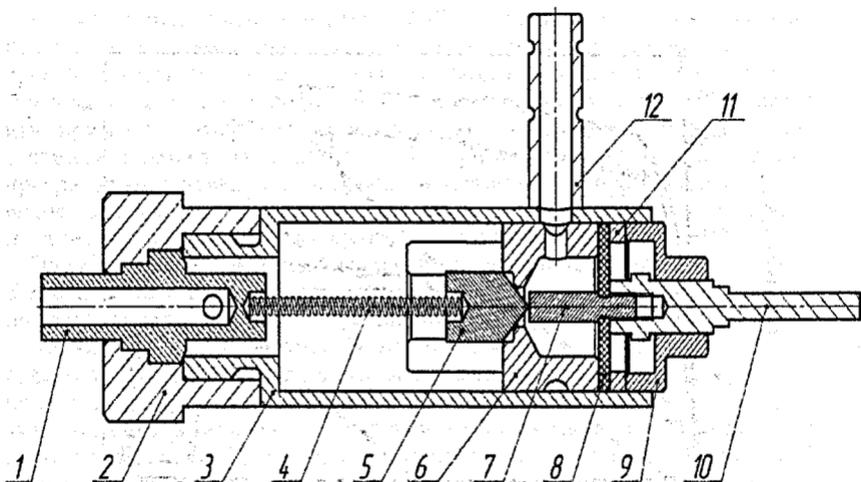
Предварительно были проведены исследования по выбору режимов задания формы TiNi элементу. Образцы исполнительного элемента подвергали термической обработке при температурах 400, 450, 500, 550 °С с выдержкой 1; 2; 3 часа и закалке в воде. Далее на испытательной машине ИП 5158-5 TiNi образцы подвергали нагрузке – разгрузке (рисунок 1).

Из анализа полученных данных выбран наиболее оптимальный режим задания формы: нагрев до 500 °С, выдержка 1 час и последующая закалка в воде. При данной температуре в образце развивается минимальное напряжение, которое соответствует фазовому пределу текучести, т.е. осуществляется переход от упругой деформации к пластической. Таким образом, образец отожженный при температуре 500 °С в течение 1 часа более пластичен и является лучшим вариантом для применения в конструкции разработанного запорного клапана (рисунок 2).



Температура отжига: 1 – 400 °С; 2 – 450 °С; 3 – 500 °С; 4 – отжиг 550 °С;  
 Время термообработки: а) – 1 час; б) – 3 часа

Рисунок 1 – Кривые напряжение – деформация TiNi элемента



1 – втулка; 2 – винтовая крышка; 3 – корпус; 4 – TiNi элемент; 5 – золотник; 6 – перепускная втулка; 7 – винт; 8 – мембрана; 9 – крышка; 10 – шток; 11 – кольцо; 12 – ниппель

Рисунок 2 – Запорный клапан с TiNi исполнительным элементом

Работа запорного клапана осуществляется следующим образом. Вода подается во втулку 2 и через отверстие поступает непосредственно в корпус клапана 3 и перепускную втулку 6. При рабочей температуре воды TiNi элемент 4 находится в сжатом состоянии, что позволяет воде беспрепятственно поступать через зазор между золотником 5 и перепускной втулкой 6 в отверстие втулки и ниппель 12. Если температура воды достигнет критического значения  $48 \pm 50$  °С, то за счет реализации эффекта памяти формы срабатывает TiNi элемент 4. Золотник 5, смещаясь вперед, закрывает зазор и предотвращает поступление воды в ниппель.

Данная конструкция запорного клапана прошла натурные испытания и может быть рекомендована к практическому использованию.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Материалы с эффектом памяти формы: справ. изд.: в 4 т. / редкол.: В.А. Лихачева и [др.]. – Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ, 1998. – Т.2. – 374 с.
2. Фаткулина, Л.П. Сплавы с памятью формы на основе никелида титана // Технология легких сплавов. – 1990. – № 4. – С. 48.
3. Ситников, Н.Н. Изготовление и исследование аморфно-кристаллических быстрозакаленных лент из сплава TiNiCu: труды XIX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов / Н.Н. Ситников, А.В. Шеляков, А.П. Менушенков; РКК «Энергия» им. С.П. Королева. – 2012. – Сер. XII. В. 1-2. – С. 275.
4. Способ обработки изделий из сплавов на основе никелида титана для получения низкотемпературной обратимой памяти формы: пат. / С.Б. Масленков; заявитель Институт металлургии им. А.А. Байкова; заяв. 20.04.87; опубл. 15.07.89. // Офиц. Бюл. № 26.

## ОСОБЕННОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ ПРЕСС-ФОРМ ЧАСТИЦАМИ НЕ-ИЗОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

*Рудь В.Д., Шыберко В.В., Повстяной А.Ю.*  
Луцкий национальный технический университет,  
Луцк, Волынская область, Украина

**Постановка проблемы.** Благодаря своим свойствам порошковые материалы находят разнообразные применения во многих сферах промышленности. Получение новых материалов с качественными структурными свойствами возможно с помощью традиционной технологии порошковой металлургии. При изготовлении таких материалов с необходимым комплексом свойств нужно контролировать параметры их структуры в процессе реализации технологии на всех ее этапах. Это касается, в первую очередь, операции засыпки в пресс-формы. Известно, что реальные порошки имеют разнообразную форму и широкую гамму по гранулометрическому составу. В случае использования частиц регулярной, шарообразной формы получим материалы с более или менее однородными свойствами по объему. Ситуация осложняется при использовании частиц нерегулярной формы. Исследовать структуры и физико-механические характеристики заготовок, полученных с помощью таких частиц, в натуральных экспериментах сложно по причине большого разнообразия порошков по форме и размерам. Поэтому исследование структуры таких материалов на базе частиц нерегулярной формы методом компьютерно - имитационного моделирования является актуальной задачей.

**Анализ последних публикаций.** Анализ структурно-неоднородных материалов проводят научные коллективы под руководством Р.М. Кадушникова, И.Г. Каменина, Ю.Н. Крючкова. Особенность этих работ заключается в том, что моделируются структурные характеристики материалов, изготовленные из частиц регулярной формы. Рассматриваются варианты моно- и полидисперсной засыпки. В работе В.Д. Рудя, В.В. Сергеева, Т.М. Павлыго, Г.Г. Сердюка, Л.И. Свистуна представлены результаты компьютерно-имитационного моделирования засыпки сферических частиц двух типоразмеров. Полученные результаты качественно воспроизводят процесс заполнения пресс-формы [2, 4, 5].

**Цель работы:** разработать компьютерно - имитационную модель засыпки пресс-форм различной формы частицами нерегулярной формы, а также провести визуальный анализ параметров образованных в результате структур.

**Основные результаты исследования.** Некоторые физико-структурные характеристики материалов в той или иной степени зависят от формы частиц, поэтому при исследовании этих характеристик на математических моделях необходимо учитывать отклонения формы частиц от сферической. В качестве критерия нерегулярности нами использован такой параметр формы частиц, как отношение от малого до большого размеров частиц. На рисунке 1 показано окно программы при использовании частиц в форме эллипсов [1, 2, 3].

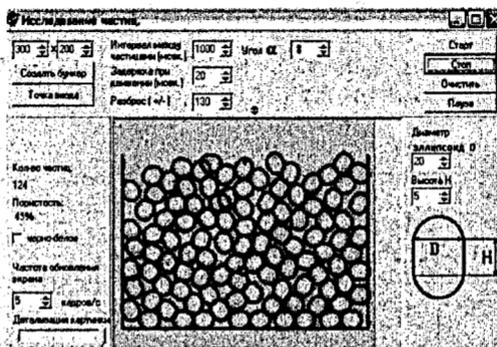


Рисунок 1 – Вид окна заполнения частиц нерегулярной формы

При разработке компьютерно-имитационной модели использованы следующие условия: каждый элемент в упаковке описывается девятью обобщенными координатами центра, длинами трех полуосей и трех узлов Эйлера (направляющих осей эллипсоида). Эллипсоиды вращения являются частным случаем трехосного эллипсоида, в котором две оси равны. Итак, эллипсоиды вращения полностью описываются восемью обобщенными координатами. Условия не пересечения двух эллипсоидов определить значительно сложнее, так как они связаны с нахождением отсутствующих корней системы двух эллиптических уравнений. Аналогично определяют условия непересечения эллипсоидов с границами гипотетического контейнера. Эти условия не имеют аналитической записи, решение проводится только численными методами. Покажем последовательность этих операций, обозначив элементы определителя преобразований через:

$$\begin{aligned}
 l_1 &= \cos \varphi \cos \psi - \cos \theta \sin \psi \sin \varphi; \\
 m_1 &= \sin \psi \cos \varphi - \cos \theta \cos \psi \cos \varphi; \\
 n_1 &= \sin \theta \sin \varphi; \\
 l_2 &= -\cos \psi \sin \varphi - \cos \theta \sin \psi \cos \varphi; \\
 m_2 &= -\sin \psi \sin \varphi - \cos \theta \cos \psi \cos \varphi; \\
 n_2 &= \sin \theta \cos \varphi; \\
 l_3 &= \sin \theta \sin \psi; \\
 m_3 &= -\sin \theta \cos \psi; \\
 n_3 &= \cos \theta
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\varphi$  – угол вращения вокруг новой оси аппликат;

$\psi$  – угол между осью абсцисс и прямой пересечения координатных плоскостей с постоянной аппликатой;

$\theta$  – угол между осями аппликат.

Углы  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$  являются обобщенными координатами эллипсоида в пространстве. В свою очередь, фактор формы при моделировании задается случайным значением этих углов, отражающих индивидуальные структурные свойства материалов. Результаты расчетов угла вращения относительно осей координат, а также фактора формы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость пористости от угла и фактора формы

Q, %	$\alpha$ , град	Q, %	FF
0,35	0-10	0,35	0,9
0,45	8-9	0,45	0,8
0,55	7-8	0,55	0,7
0,65	5-6	0,65	0,5
0,75	2-4	0,75	0,3

Учитывая (1) уравнения  $i$ -го эллипсоида, получим следующий вид:

$$\frac{(l_{1i}x + l_{2i}y + l_{3i}z + x_i)^2}{a_i^2} + \frac{(m_{1i}x + m_{2i}y + m_{3i}z + y_i)^2}{b_i^2} + \frac{(n_{1i}x + n_{2i}y + n_{3i}z + z_i)^2}{c_i^2} = 1, \quad (2)$$

где  $x_i, y_i, z_i$  – координаты эллипсоида;  $a_i, b_i, c_i$  – длины полуосей, обобщенные координаты  $i$ -го эллипсоида.

Из уравнения (2) определим  $z$  в виде выражения:

$$z = f_1(x, y) \pm \sqrt{g_i(x, y)}, \quad (3)$$

где  $f_1(x, y)$  и  $g_i(x, y)$  многочлены второй степени, которые рассчитаны коэффициентами преобразования (1) и другими обобщенными координатами.

Для определения непересечения  $i$ -го и  $j$ -го эллипсоидов применяем следующее выражение:

$$\varphi_{ij}(x, y) = f_i(x, y) - f_j(x, y) - \sqrt{g_i(x, y)} - \sqrt{g_j(x, y)}, \quad (4)$$

который является разницей второй части кривой (3)  $i$ -го эллипсоида, а также верхней части  $j$ -го эллипсоида, если  $z_i > z_j$ . В области определения  $\varphi_{i,j}(x, y)$  это выражение имеет положительный минимум. Если эллипсоиды не пересекаются, будет выполняться следующее условие:

$$\min \varphi_{i,j}(x, y) \geq 0, \quad (5)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; i \neq j$ , тогда все  $n$  эллипсоиды будут образовывать упаковку нерегулярной формы.

Из полученных данных компьютерно - имитационного моделирования засыпок эллипсоидов в пресс-формы можно сделать вывод, что фактор формы выступает в качестве показателя характеризующего параметра изменения структуры и пористости заготовки. В дальнейших исследованиях с целью определения фактических структурных изменений заготовок планируются эксперименты упаковки эллипсов в зависимости от размеров частиц и их гранулометрического состава.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белов, С.В. Пористые проницаемые материалы: справочник. – М.: Металлургия, 1987. – 332 с.
2. Кадушников, Р.М. Геометрическое моделирование структуры материалов // Порошковая металлургия. – 1989. – 140 с.
3. Каменин, И.Г. Имитационное моделирование случайной неоднородной структуры порошков // Порошковая металлургия. – 1997. – 302 с.
4. Крючков, Ю.Н. Оценка структурного совершенства пористых материалов // Порошковая металлургия. – 1996. – 220 с.
5. Рудь, В.Д. Имитационная модель засыпки частиц порошков и ее использование при разработке технологии приготовления шихты карбидосталей // Моделирование в материаловедении. – 2006. – 320с.

**БОРТОВЫЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ УСТАНОВКИ***Некрасова С.О., Довгялло А.И.*

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),  
Самара, Российская Федерация

Бортовые криогенные установки малой холодопроизводительности, используемые сегодня для нужд космической техники, представляют собой машины Стирлинга. В России они изготавливаются под конкретную целевую задачу специального назначения и не обладают таким большим ассортиментом, как в экономически развитых странах. Указанный изготовителем ресурс определяется для конкретных условий эксплуатации серийного образца, который очень часто оказывается шадящим, по сравнению с условиями эксплуатации в космосе.

В результате, такая криогенная машина может не обеспечить на борту космического аппарата заявленных характеристик. Существующие на сегодняшний день ГКМ Стирлинга на 80 К имеют заявленный ресурс в 10000 часов, в то время как ресурс их европейский аналогов достигает 40000 часов [1,2]. Более того, эффективных высокоресурсных микрокриогенных установок с температурой криостатирования 20 К, которые уже сегодня необходимы для систем инфракрасного наблюдения, не существует вообще.

Исходя из этого, первой причиной, по которой термоакустические охладители должны вытеснить механические, является их высокий ресурс эксплуатации. Даже по самым скромным оценкам ресурс таких установок превысит 100000 часов.

Несмотря на очевидное преимущество в ресурсе, такая установка в целом обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, использование термоакустического компрессора взамен электрического приведёт к повышению затрат энергии более чем в два раза. Это очень ощутимо в условиях дефицита бортовой электроэнергии.

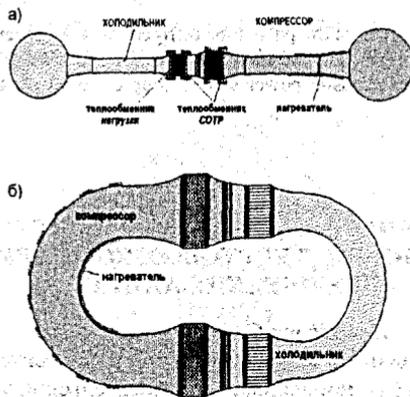
Во-вторых, такая система будет тяжелее, чем механический аналог за счёт присутствия резонаторов. По разным предварительным оценкам, масса такой системы будет выше в 1,2 – 2 раза. Здесь следует отметить, что эта оценка дана для случая использования бортовой электроэнергии, которая в свою очередь получена с коэффициентом преобразования порядка 20%.

Одним из способов преодоления энергетической проблемы для нагрева горячего теплообменника является не электронагрев, а непосредственно солнечное излучение (концентратор лучистой энергии) или радиоизотопный источник тепла.

В этом случае исключается энергетическая цепочка получения части электроэнергии в системе электропитания космического аппарата, которая обеспечивает функционирование криогенной системы. То есть, если для термоакустического криоохладителя использовать электропривод (пусть это будет самый совершенный Стирлинг с пульсационным охладителем), то для потребной холодопроизводительности в 1 Вт на уровне 80 К необходимо 30 Вт электрической мощности. Эти 30 Вт производятся бортовой энергосистемой (фотоэлек-

трические преобразователи, термоэлектрические или термоэмиссионные преобразователи с ядерным или радиоизотопным источником тепла) с коэффициентом преобразования 20% из 150 Вт подведенного тепла. Таким образом, для получения 1 Вт холода на уровне 80 К необходимо 150 Вт подведенного тепла.

Рассмотрим термоакустический криоохладитель с генерацией пульсаций в термоакустическом контуре прямого цикла, например, холодильник Хофлера (рис.1). Назовем его – «теплоиспользующий термоакустический охладитель». Пусть необходимая холодопроизводительность  $Q_x = 1$  Вт на уровне  $T_x = 80$  К генерируется в холодном контуре с коэффициентом преобразования (холодильный коэффициент  $\varepsilon = \frac{Q_x}{W} = 25\%$  от цикла Карно). Тогда при холодильном коэффициенте по Карно  $\varepsilon_c = \frac{T_x}{T_{гх} - T_x} = \frac{80}{350 - 80} = 0.3$  эффективный холодильный коэффициент будет равен 0.075, что означает, что для получения 1 Вт холода потребуется 13 Вт эффективной акустической мощности (здесь  $Q_x$  - потребная холодопроизводительность,  $W$  - эффективная акустическая мощность,  $T_x$  - температура криостатирования,  $T_{гх}$  - температура «горячего» теплообменника холодного контура).



а) система на основе пульсационных труб,  
 б) система с волной, циркулирующей по тороидальному резонатору  
 Рисунок 1 – Варианты исполнения холодильника Хофлера [3],  
 не содержащего подвижных частей

Если использовать внешнее тепло непосредственно в контуре прямого цикла с коэффициентом преобразования тепла в акустическую энергию волны в 20 % (это внутренний к.п.д. ТАП прямого цикла), то для получения эффективной акустической мощности  $W = 13$  Вт потребуется (предположительно, с запасом в два раза)  $W = 26$  Вт индикаторной мощности (волновой энергии). Эта мощность  $W = 26$  Вт генерируется в контуре прямого цикла с к.п.д. 20 %, что соответствует потребному подведенному к горячему теплообменнику теплу  $Q_{гх} = 130$  Вт.

Таким образом, предварительная оценка эффективности получения холода на уровне температуры криостатирования 80 К в теплоиспользующем термоакустическом охладителе даст весьма оптимистические прогнозы.

Ещё одной важной особенностью теплоиспользующего термоакустического охладителя является наличие четырех температурных уровней, а не трех, как в поршневой теплоиспользующей машине Такониса. То есть "горячий" теплообменник сброса тепла холодного контура может иметь иную температуру, чем холодный теплообменник сброса тепла горячего контура.

Это позволяет работать последнему на более высоких уровнях температуры, что в свою очередь существенно уменьшает массу и габариты радиатора-излучателя, обслуживающего этот контур. Это компенсирует некоторую объективную "громоздкость" термоакустического преобразователя.

Создание криогенных бортовых систем с температурным уровнем 20-40 К и приемлемым ресурсом представляется возможным при условии использования двухступенчатых термоакустических охладителей.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Qiu, L.M. Chen Investigation on a thermoacoustically driven pulse tube cooler working at 80 K / L.M. Qiu, D.M. Sun, W.L. Yan, P. Chen, Z.H. Gan, X.J. Zhang, G.B. // Cryogenics 45. – 2005. – P. 380-385.

2. Radebaugh, R. Development of the pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler. – London: Proc. Inst. Refrigeration 2000. – P. 11-29.

3. Hofler, T.J. Heat driven acoustic power source coupled to an electric generator, US Patent № 5,647,217. – 1997.

УДК 621.486

## ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ В БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Некрасова С.О., Довгялло А.И.*

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С.П. Королева (национальный исследовательский университет)  
Самара, Российская Федерация

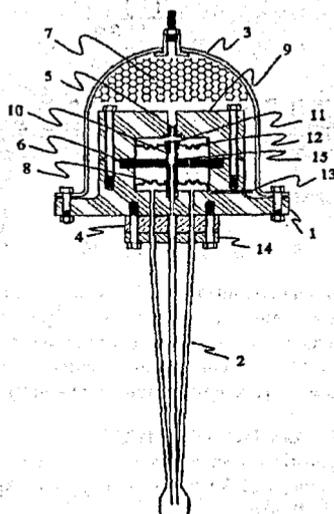
Одной из главных тенденций развития ракетно-космической отрасли является повышение удельных показателей, увеличение ресурса и срока службы космических аппаратов при одновременном снижении их массогабаритных показателей. Перспективным направлением здесь является разработка и внедрение энергетических установок на основе термоакустических двигателей для электропитания космических аппаратов. Термоакустические двигатели имеют множество преимуществ. Во-первых, в данных устройствах может реализовываться внешний подвод тепла, например, от поступающего солнечного излучения или радиоизотопных источников. Во-вторых, данные устройства не содержат каких-либо движущихся частей, за исключением подключенных нагрузок (линейных электрических генераторов). В-третьих, они имеют достаточно высокую

эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую. Ряд зарубежных научно-исследовательских центров приводят данные, которые свидетельствуют о принципиальной возможности использования термоакустических двигателей [1,2] и охладителей в составе систем электропитания космических аппаратов, в том числе работающих за счет атомной энергии [3,4]. Они позволяют обеспечить надежную работу энергетических установок без обслуживания, с ресурсом более 6 лет, при КПД преобразования тепловой энергии в электрическую на уровне 20-25 % [2]. В качестве источника тепла могут использоваться радиоизотопные тепловые блоки.

В настоящее время можно выделить следующие основные направления:

- термоакустические двигатели и конверторы представляют собой тепловые машины с термоакустическим циклом Стирлинга (рис.1). Наиболее интересным и перспективным в этой области является зародившееся в последние годы направление по производству TAR, в которых электрическая часть альтернатора является не просто механической нагрузкой, а составляющей единой колебательной цепи с бегущей волной. Лидер производства MEMS TAR, Fellows Research Group, производит TAR размером от 10 см до нескольких мм, которые изготавливаются по технологии микрочипов, а коэффициент трансформации энергии таких систем достигает 50%;

- термоакустические холодильники холодопроизводительностью от 10 до 1000 Вт на температурном уровне 80 К и ниже.

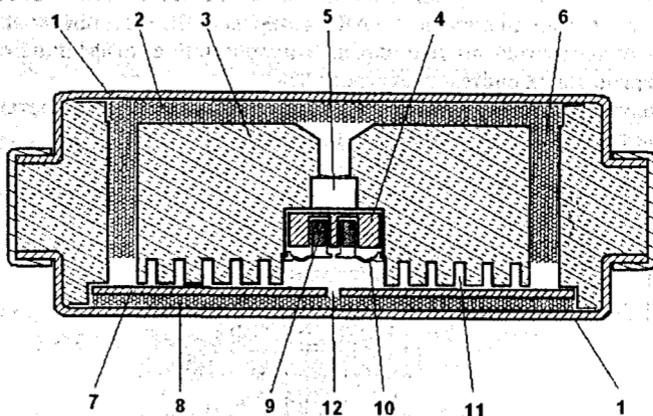


- 1 – корпус двигателя-генератора; 2 – волновод первого теплообменника;  
 3 – камера давления; 4 – термический прерыватель; 5 – первый контрольный клапан;  
 6 – обмотка возбуждения; 7 – второй теплообменник; 8 – пружинная диафрагма;  
 9 – тело генератора; 10 – якорь; 11 – второй контрольный клапан; 12 – теплообменник;  
 13 – устройство контроля рабочего потока; 14 – опорная поверхность.

Рисунок 1 – Термоакустический двигатель-генератор

В России сведений по целенаправленным исследованиям в этих направлениях пока не выявлено.

Однако есть несколько основных проблем, сдерживающих их разработку и широкое применение. Прежде всего, это создание адекватной математической модели термоакустического преобразователя и соответствующего метода его расчета. Сложность расчета определяется сложностью описания взаимодействующих между собой термодинамических, гидродинамических, тепло- и массообменных процессов во внутреннем контуре. Еще одна проблема заключается в создании некоторых узлов термоакустического двигателя, сложностях с уплотнениями, регулированием мощности и т.д. Трудности конструктивного исполнения обусловлены применяемыми рабочими телами, в качестве которых используется гелий, азот, водород и воздух. Решение перечисленных проблем позволит создать системы электропитания и термостабилизации космических аппаратов принципиально нового типа и существенно расширить возможности последних.



- 1 – внешняя теплопроводящая поверхность; 2 – горячий теплообменник;  
3 – термическая изоляция; 4 – магнит; 5 – устройство генерации волн;  
6 – соединительные каналы; 7 – инерционная пластина; 8 – холодный теплообменник;  
9 – якорь; 10 – поршень; 11 – каналы с рабочей жидкостью; 12 – дозирующий жиклер  
Рисунок 2 – Схематическое представление конструкции МЭМС (ТАР)

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Backhaus, S. Thermoacoustic power systems for space applications [Text] / S. Backhaus, E. Tward, M. Petach // Proceedings of Space Technology and Applications International Forum. AIP Press. – New York, 2002. – P. 656.
2. Petach, M. Design of a high efficiency power source (HEPS) based on thermoacoustic technology [Text] / M. Petach, E. Tward, S. Backhaus // Final report. NASA Contract No. NAS3-01103, CDRL 3f, 2004 – P. 40.
3. Martin1, J.L. Low-cost, high-performance cryocoolers for in-situ propellant production / J.L. Martin1, J.A. Corey2, T.A. Peters // ISRU III Technical Interchange Meeting.
4. Marquardt ED, Radebaugh R. Pulse tube oxygen liquefier // Adv Cryo Eng2000:45457–64.

## РАСЧЁТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ПУЛЬСАЦИОННОГО ОХЛАДИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Довгялло А.И.<sup>1</sup>, Благин Е.В.<sup>1</sup>, Лукашева М.В.<sup>2</sup>, Некрасова С.О.<sup>1</sup>,  
Угланов Д.А.<sup>1</sup>*

- 1) Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва (научно-исследовательский университет),  
Самара, Российская Федерация;
- 2) РКЦ «Прогресс», Самара, Российская Федерация

Охладители на основе пульсационной трубы (рис.1) как развитие холодильных машин Гиффорда-Макмагона были представлены впервые в середине 60-х годов Гиффордом и Лонгсуортом [1]. Развитие теории пульсационных преобразователей до области термоакустического взаимодействия полей давления и скорости позволило получить необходимое фазирование данных параметров по времени. Пульсационные системы на основе стоячей волны в настоящее время стали классифицировать как термоакустические охладители [2].

Если в ГKM (Стирлинга, Гиффорда, Вьюлюме) перемещение рабочего тела осуществляется как минимум двумя поршнями, то в пульсационном охладителе роль поршня-вытеснителя выполняет пульсационная труба с вспомогательным теплообменником, жиклером и резервуаром (буферной полостью) (рис.1).

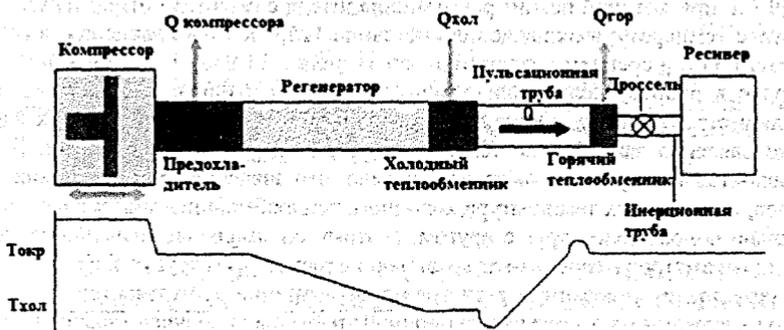


Рисунок 1 – Схема холодильника на основе пульсационной трубы

К энергетическим достоинствам акустических машин следует отнести тот факт, что рабочий газ в процессе цикла совершает перемещение на глубину акустического смещения, в то время как в холодильнике Стирлинга он перемещается через весь регенератор и теплообменники. Кроме того, термоакустические охладители на основе пульсационной трубы обладают меньшим количеством подвижных механических частей или не имеют таковых вообще. Это существенно повышает ресурс системы, а также снижает их стоимость.

Для разработки расчетной модели охладителя на основе пульсационной трубы был использован программный комплекс DeltaEC (Design Environment for Low-amplitude ThermoAcoustic Energy Conversion – разработка Los Alamos National Laboratory, версия - 6.3b11, свободная лицензия), предназначенный для моделирования акустических устройств и описания термоакустических процессов в них и являющийся основным средством получения их конструктивных параметров.

Для разработки расчетной модели охладителя на основе пульсационной трубы за основу взята конструкция холодильной установки, представленной в работе [3] (рис.2).

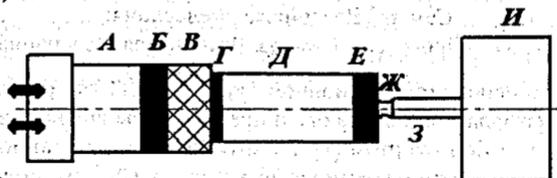


Рисунок 2 – Принципиальная схема пульсационного охладителя с разбиением на расчетные сегменты по функциональным признакам

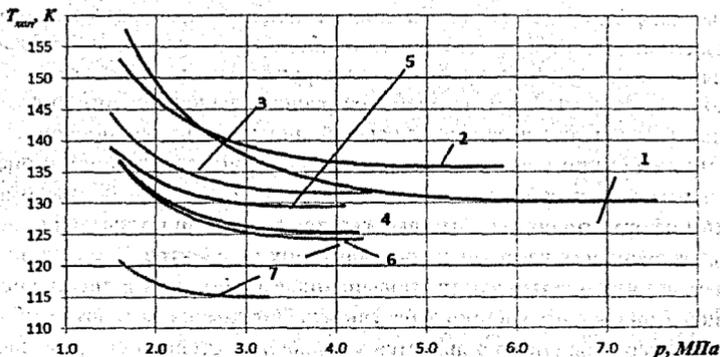
Начальные параметры для расчетной модели – давление, частота осцилляций, объемная скорость потока - выбирались, исходя из того, что подвод акустической энергии в устройство осуществляется при помощи линейного пульсатора давления STAR фирмы «QDrive».

Для исследования модели получена резонансная частота работы охладителя  $f = 59$  Гц, при которой режим работы охладителя считается оптимальным, в результате температура охлаждения составила 125,6 К (для сравнения; в [8] при частоте 65 Гц и среднем давлении рабочего тела 1,8 МПа,  $T_{хол} = 125,74$  К).

Далее в работе исследовалось влияние конструктивных параметров, таких как диаметры теплообменников, пульсационной и инерционной труб, их длин, а также давления заправки на температуру в холодном теплообменнике. В ходе предварительного расчета было обнаружено, что значения геометрических параметров, при которых температура холодного теплообменника минимальна, незначительно коррелируют друг с другом, поэтому оптимальные значения геометрических параметров можно считать условно независимыми друг от друга.

В результате проведенных расчетов по оптимизации прототипа термоакустического охладителя на основе пульсационной трубы было получено значение температуры охлаждения, равное 115 К. Оптимизация проводилась по проходным сечениям передающей трубы, входного теплообменника, регенератора, горячего и холодного теплообменников и пульсационной трубы, а также по длине: регенератора, пульсационной и инерционной труб и по среднему давлению в цикле.

На первом этапе был найден оптимальный диаметр передающей трубы А, входного теплообменника Б и регенератора В, затем, исходя из полученных данных, была проведена оптимизация диаметров холодного Г и горячего Е теплообменников и пульсационной трубы Д. Для каждого этапа оптимизации было рассчитано оптимальное давление на входе, позволяющее получить наименьшую температуру холодного теплообменника.



1 – исходная модель; 2 – оптимизация по  $R_{A-B}$ ; 3 – оптимизация по  $R_{A-E}$ ;  
 4 – оптимизация по  $R_{A-Ж}$ ; 5 – оптимизация по  $R_{A-Ж}, L_B$ ;  
 6 – оптимизация по  $R_{A-Ж}, L_B, L_D$ ; 7 – оптимизация по  $R_{A-Ж}, L_B, L_D, L_Ж$   
 Рисунок 3 – Зависимость  $T_{кон}$  от среднего давления в цикле для всех этапов расчета оптимизации модели

В результате оптимизации модель установки будет иметь следующие конструктивные параметры (табл.5). Расчетное значение эффективного холодильного коэффициента  $\epsilon$  как отношение холодопроизводительности  $Q_C$  к подводимой к альтернатору электроэнергии  $W_{эл}$  для пульсационного охладителя составило 3 % ( $Q_C = 4 \text{ Вт}$ , и  $W_{эл} = 120 \text{ Вт}$ ).

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gifford, W.E. and Longworth, R.C., Pulse tube refrigeration, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, paper No. 63-WA-290, August 1964.
2. Swift, G.W. Thermoacoustic engines, J. Acoust. Soc. Am., 84, 1145-1180 (1988).
3. Farouk, B., Dion, A. Experimental and numerical investigations of cryogenic pulse tube refrigerators // VIII Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources". Minsk, Belarus, September 12–15, 2011.

УДК 620.004.5

## КЕПСТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

*Парфиевич А.Н., Драган А.В.*

Брестский государственный технический университет,  
 Брест, Республика Беларусь

**Введение.** Для определения технического состояния исследуемых объектов акустическая диагностика использует информацию, содержащуюся в акустическом сигнале и включающую не только акустическое поле объекта, но и другие колебательные процессы, сопровождающие его функционирование. При исследовании широко используется информация, содержащаяся в колебательных процессах узлов и отдельных деталей машины, распределение колебательных процессов в рабочих средах работающих узлов и т.п. Акустический подход, ос-

нованный на рассмотрении колебательных явлений в механических конструкциях как волнового процесса, является наиболее универсальным, так как он базируется на закономерностях, общих для упругих волн в любой среде.

**Основная часть.** Одним из наиболее распространенных методов акустической диагностики является спектральный анализ который получил широкое распространение при исследованиях процессов шумообразования и оценки качества изготовления зубчатых пар при производстве. Данный способ обладает хорошей информативностью, что выражается в наличии чрезвычайно большого количества значащих частотных составляющих на спектре. Это в свою очередь ведет к тому, что предъявляются повышенные требования к специалисту, производящего анализ полученного результата. Одним из вариантов облегчения восприятия картины спектра является уменьшение степени его разрешенности, что может привести к утрате данных и является недопустимым при диагностике состояния оборудования.

Для разбора спектра акустического сигнала и устранения недостатков спектрального анализа возможно применение кепстрального анализа, используемого для исследования акустических сигналов, содержащих в сигнале большое количество составляющих, принадлежащих различным гармоническим рядам. При таких сигналах трудно проследить за изменением спектра при изменении состояния механизма. Кепстр акустического сигнала позволяет выявлять наиболее дефектные зубчатые пары в многовальных приводах, сравнивать их между собой по степени поврежденности или уровню износа и вероятности наличия дефекта. Кепстр же позволяет получать компактную и наглядную информацию [1,2,3].

Кепстром называют квадрат преобразования Фурье логарифмического спектра мощности шума [1]:

$$K(\tau) = \left\{ \int_0^{\infty} \lg |F(\omega)|^2 \cos(\omega\tau) d\omega \right\}^2, \quad (1)$$

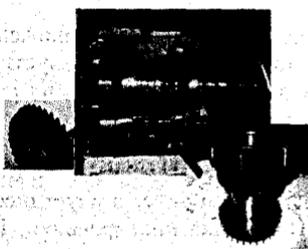
где  $F(\omega)$  — спектр мощности сигнала;  $\tau$  - независимая переменная, носит название квефренси (искажение от английского "фреквенси" - частота) и имеет размерность времени

Отличие кепстра от спектра заключается в том, что логарифмическое преобразование делает его менее чувствительным к неоднородностям преобразуемого сигнала (изменениям общей формы и ширины полос). Поэтому кепстр имеет отличные от нуля значения только при значительных периодических составляющих.

Для реализации сущности кепстрального анализа в качестве объекта исследования был подготовлен объект — коробка передач универсального токарного станка СН-401/501 из парка станочного оборудования БрГТУ (рис. 1) и разработана методика мониторинга технического состояния с использованием аппаратно-программного комплекса.



а)



б)

Рисунок 1 – а) Общий вид универсального токарного станка СН-401/501; б) Вид коробки передач с демонтированной крышкой с указанием расположения экспериментальных зубчатых колес 2-го вала в составе привода (слева - экспериментальная шестерня  $z=43$ , на которой моделировался дефект в виде скола зуба; справа - экспериментальный блок зубчатых колес  $z=38$ ,  $z=35$ ,  $z=32$  3-го вала привода, на котором моделировались погрешности профиля зубьев)

Для проверки методики оценки зубчатых приводов и компьютерной системы проведены эксперименты, предусматривающие моделирование различных отклонений отдельных зубчатых колес от нормального состояния и проверку акустического сигнала с применением диагностических признаков, известных из литературных источников и установленных в ходе выполнения самостоятельных исследований.

В соответствии с программой экспериментальных работ по измерению акустических характеристик зубчатых передач в составе многовальных приводов проведены замеры акустических параметров на различных режимах. Замеры производились на всех передачах. Результаты, полученные при использовании серийных колес, приняты в качестве эталонных.

На рисунках 2 [4] приведены спектр и полученный из него кепстр акустического сигнала. На кепстре четко различима рахмоника, имеющая значение квефренси 67,73мс, а также менее выраженную – со значением квефренси 71,15 мс. Их наличие свидетельствует о том, что изменении спектра мощности шума посредством преобразования Фурье на полученном кепстре присутствует ряд гармонических частот, отстоящих друг от друга на величину 14,8Гц, и ряд гармоник на расстоянии 12,9Гц друг от друга. При расчете частот вынужденных колебаний были установлены приведенные выше значения, соответствующие частотам вращения первого и второго вала привода, на которых установлены экспериментальная шестерня (с локальным дефектом зуба) и экспериментальный блок зубчатых колес (с погрешность профиля). Причем явно выраженное значение квефренси на 67,73мс на кепстре свидетельствует о том, комбинированные составляющие от погрешности зуба шестерни на втором валу вносят больший вклад в формирование окончательного акустического сигнала от исследуемого дефектного зубчатого колеса. Эта же информация может быть получена и в результате спектрального анализа в ходе анализа большого количества составляющих спектра от различных источников.

Результаты акустических исследований приводов с различного рода дефектами показали, что есть следующие закономерности, проявляющиеся в кепст-

рах анализируемых сигналов. Положения, соответствующие периодам гармонических составляющих спектра акустического шума, и величины пиков кепстра, определяющиеся размером амплитуд всех составляющих гармонического ряда, являются диагностическими признаками дефектов исследуемых зубчатых колес и также требуют проверки в ходе экспериментальных работ.

**Заключение.** Практически любое отклонение состояния зубчатых колес от нормы приводит к отклику в акустическом сигнале, что может быть успешно использовано при диагностировании. На основании этого применение кепстрального анализа довольно перспективно при изучении текущего состояния привода, т.к. данный метод обладает высокой степенью помехозащищенности, в силу нечувствительности к изменениям фазы исследуемых сигналов, но в свою очередь требует высокой подготовленности и большого опыта специалиста, чтобы правильно интерпретировать результаты и делать верные выводы о состоянии исследуемого объекта.

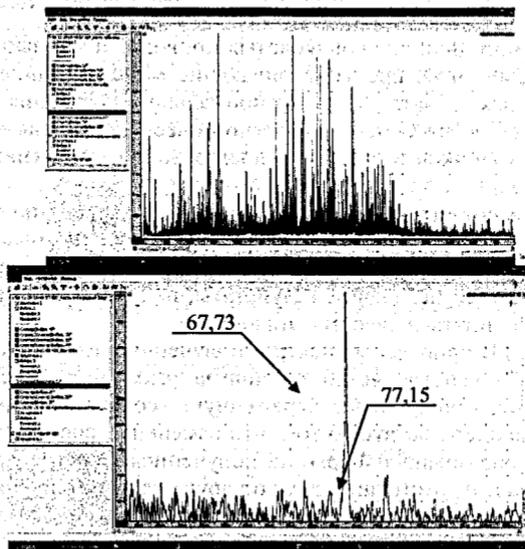


Рисунок 2 – Спектр и кепстр акустического сигнала многовального привода с дефектом зуба и погрешностью профиля зубчатых колес на разных валах (сверху вниз) [4]

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Артоблевский, И.И. Введение в акустическую динамику машин / И.И. Артоблевский, Ю.И. Бобровницкий, М.Д. Генкин. – М.: Наука, 1979. – 296 с.
2. Коллакот, Р.А. Диагностирование механического оборудования; перевод с английского. – Л.: Судостроение, 1980. – 296 с.
3. Попков, В.И. Виброакустическая диагностика в судостроении / В.И. Попков, Э.Л. Мишинский, О.И. Попков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.
4. Разработка методов и мобильных средств диагностики механических систем автотракторной техники в процессе ее эксплуатации: отчет о НИР №ГБ11/101 (заключительный) / Брестский государственный технический университет; руководитель работы А.В. Драган; № госрегистрации 20111589. – Брест, 2013. – 162с.

## КОЛОНОСКОПИЧЕСКИЙ TiNi СТЕНТ

*Рубаник В.В.<sup>1,2</sup>, Рубаник В.В. мл.<sup>1,2</sup>, Лезкоступов С.А.<sup>1,2</sup>,  
Денисенко В.Л.<sup>3</sup>, Матвеев К.С.<sup>4</sup>*

- 1) Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь,
- 2) Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь,
- 3) Вторая Витебская областная клиническая больница, Витебск, Беларусь,
- 4) Научно-технологический парк Витебского государственного технологического университета, Витебск, Беларусь

В настоящее время наука и медицина тесно связаны между собой и обуславливают развитие друг друга. Существует большое количество весьма успешных совместных разработок. Одной из таких является стентирование различных органов.

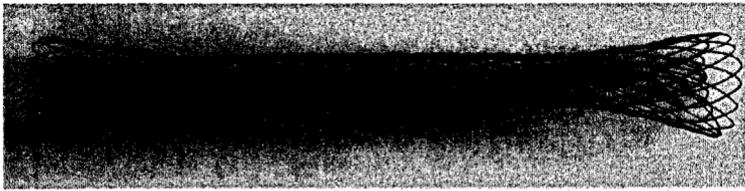
Повсеместное использование саморасширяющихся стентов из сплава с эффектом памяти формы (ЭПФ) обусловлено их малотравматичностью, эффективностью ликвидации острой непроходимости полого органа. В медицинской практике Республики Беларусь используются зарубежные стенты (Южная Корея, Германия, Чехия, Китай и др.). В связи с этим, разработка отечественного колоноскопического (колоректального) стента позволит отказаться от импорта зарубежных аналогов и сделает процедуру стентирования более доступной для различных слоев населения.

В совместной лаборатории перспективных материалов и технологий ИТА НАН Беларуси и Витебского государственного технологического университета, со специалистами Витебской областной клинической больницы №2 разработан колоноскопический стент на основе TiNi сплава для лечения злокачественных новообразований толстого кишечника и прямой кишки с целью восстановления проходимости стенозированный органа. Совместно с научно-технологическим парком Витебского государственного технологического университета спроектированы и с помощью 3D-принтера изготовлены опытные образцы устройства доставки стента.

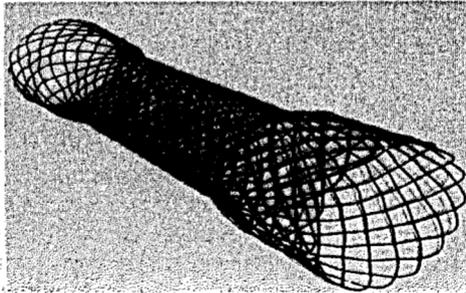
Стент — упругая металлическая конструкция в форме цилиндрического каркаса, которая помещается в просвет полых органов (артерии, пищевода, кишечника, желчевыводящих путей, мочеточника и др.) и обеспечивает расширение участка, суженного патологическим процессом [1].

В качестве материала для изготовления стентов использовали проволоку диаметром 0,25мм медицинского никелида титана (TiNi) фирмы ЗАО «ПЦ МАТЭК», марка проволоки ТН1 плавка № 09-05-001/28/160909 [2]. В исходном мартенситном состоянии стент (рис.1а) эластичен и может менять форму при температуре 0÷20°С, что обеспечивает его заправку в систему доставки (рис. 2).

После извлечения из системы доставки стент, находясь внутри человеческого тела и нагреваясь до температуры ≈ 36°С, начинает постепенно расширяться, принимая заданную форму (рис. 1б). Находясь в поврежденном участке прямой кишки, стент растягивается радиально, расширяя участок стеноза, и восстанавливает беспрепятственный проход.



а)

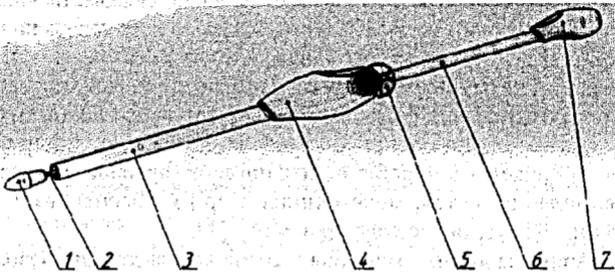


б)

а) в исходном мартенситном состоянии (условие заправки стента),  
 б) состояние стента после установки в организм

Рисунок 1 – Внешний вид колоноскопического TiNi стента

Плетение осуществляли путем навивки проволоки на специальную оснастку с последующей термической обработкой в среде инертного газа. Таким образом задавали устойчивую форму стенту при температуре выше  $\approx 36^{\circ}\text{C}$ . Особая конструкция имплантата обеспечивает комфортность ощущений пациенту после его установки.



1 – наконечник; 2 – стрела; 3 – наружная трубка; 4 – корпус;  
 5 – фиксирующая устройство; 6 – наружная трубка; 7 – ручка

Рисунок 2 – Структурная схема системы доставки стента

Эластичные концы стента не имеют острых краев, что позволяет избежать повреждения стенок сосуда при его установке и извлечении.

Разработанная технология и оснастка позволяет изготавливать стенты различной длины, диаметра и конфигурации и успешно применять их для ликвидации непроходимости прямой кишки.

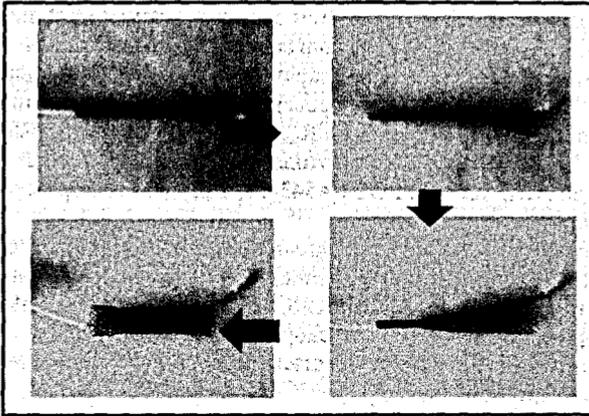


Рисунок 3 – Этапы высвобождения стента из устройства доставки

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Википедия. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Стент>. – Дата доступа: 15.02.2014.
2. Рубаник В.В. Разработка внутрисосудистых протезов (стентов) из сплава с эффектом памяти формы / В.В. Рубаник, В.В.мл. Рубаник, С.А. Легкоступов, В.Л. Денисенко // В сб.: Автоматизация и роботизация процессов и производств. - Минск, 2014. – 118-120 с.

УДК 621.89

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИН ОПТИМАЛЬНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ

*Акулич А.П., Акулич Я.А.*

Брестский государственный технический университет  
Брест, Беларусь

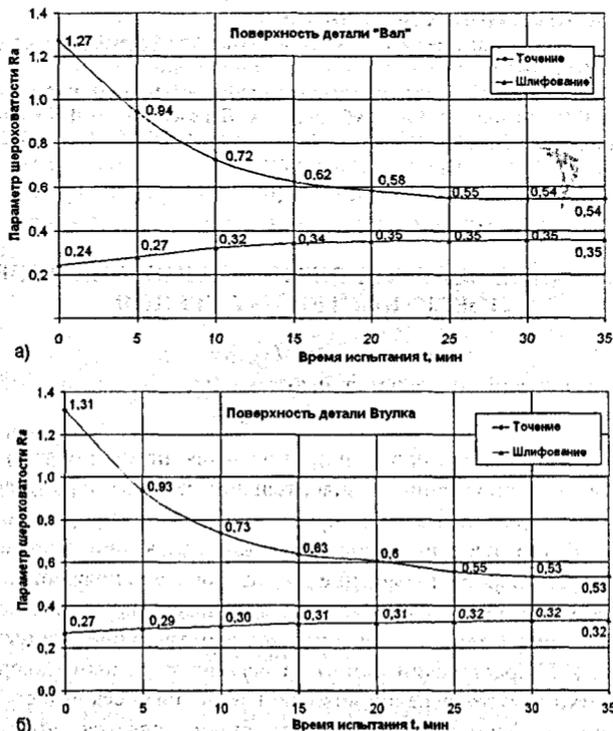
Приработка узлов трения, протекающая на заключительном этапе изготовления или в начале эксплуатации, в значительной степени определяет безотказность работы всего механизма. Формирование в результате правильно осуществленной приработки несущих поверхностных слоев при минимуме износа обеспечивает значительное повышение долговечности сопряжения.

К концу процесса приработки основные взаимосвязанные параметры качества поверхности приобретают значения, соответствующие данным условиям эксплуатации. И.В.Крагельский одним из основных условий завершения процесса приработки считает переход исходной технологической шероховатости к эксплуатационной. Данная шероховатость будет являться оптимальной для данных условий трения и обеспечивать стабильность износа пары трения при его дальнейшем постоянном режиме.

Для экспериментальных исследований величин оптимальной шероховатости пар трения были подготовлены несколько серий образцов типа “вал-втулка”, имеющих фактический усредненный параметр шероховатости сопрягаемых поверхностей трения, полученных шлифованием  $R_a = 0,27$  и точением  $R_a = 1,31$ . Радиус рабочей поверхности образцов  $R_{\text{раб.}} = 17,5$  мм. Образец, выступающий в качестве “вала” пары трения, был изготовлен из стали 40X с последующей термообработкой до HRC 40...45, ГОСТ 4543-71, а втулка – из бронзы БрОЦС 5-5-5 ГОСТ 613-79.

Трибологические испытания проводились по схеме “вал-втулка” на машине трения 2070 СМТ-1, снабжённой камерой для испытаний в жидкой среде. В качестве среды было использовано масло И-40А, ГОСТ 20799-88. Испытания проводились при нагрузке  $P=1000$  Н, скорости скольжения  $V=1,0$  м/с. Контроль температуры смазочной среды осуществляется серийно выпускаемой погружной термопарой “хромель-алюмель”.

На рис. 1 представлены кривые изменения значений среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  в процессе приработки пары трения.



а) для поверхности трения детали “вал”; б) для поверхности трения детали втулка  
Рисунок 1 – Изменения параметра среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  в процессе приработки пары трения “вал-втулка”

Из зависимостей видно, что при полученной после обработки чистовым точением характеристике качества поверхности  $R_a=1,31$  в завершении приработки наблюдалось уменьшение среднего арифметического отклонения профиля ( $R_a=0,54$  и  $0,53$ ). Вместе с тем, при испытании образцов после шлифования и соответственно имеющих более низкую исходную шероховатость ( $R_a=0,27$ ), параметр шероховатости при завершении приработки имел значения, превышающие исходные ( $R_a=0,35$  и  $0,32$ ).

Таким образом, в процессе приработки была получена оптимальная шероховатость для данных условий трения, которая должна обеспечить наиболее приемлемый износ пары трения. Следует отметить, что значение параметра оптимальной шероховатости было как больше, так и меньше исходного, что свидетельствует о влиянии способа обработки поверхностей на износные характеристики исследуемой пары трения.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента трения от времени испытания. Процесс приработки завершается через 30 минут после начала испытания, после чего пара трения переходит в равновесное динамическое состояние со стабильными значениями коэффициента трения.

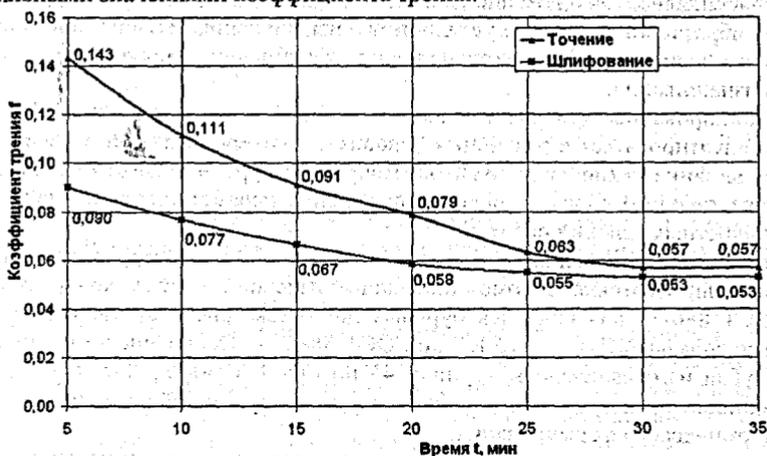


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от времени испытания пар трения в процессе приработки

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать следующие основные выводы:

- сформировавшаяся в результате приработки оптимальная шероховатость, как и другие параметры поверхностного слоя контактирующих деталей, будет зависеть от метода предварительной механической обработки поверхности;
- долговечность эксплуатации пары трения во многом будет зависеть от интенсивности изнашивания в процессе приработки и тем самым от времени приработки, таким образом, целесообразно уже на стадии изготовления технологически обеспечивать оптимальные параметры качества поверхностного слоя.

## МЕХАНОТЕРМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЗУБКОВ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

*Монтик С.В., Головач А.П.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Оснащение шарошечных долот, которые используются при бурении нефтяных и газовых скважин, твердосплавным вооружением повышает проходку и другие эксплуатационные характеристики долот. Разработанный в Российском государственном университете нефти и газа (РГУНГ) имени И. М. Губкина (г. Москва) метод электроконтактного механотермического формирования (МТФ) комбинированных изделий позволяет изготавливать комбинированные зубки, состоящие из твердосплавной рабочей головки и стального основания, что дает возможность снизить расход твердого сплава [1].

Твердосплавное вооружение долот подвергается действию абразивного, ударно-абразивного и ударно-усталостного изнашивания. В зависимости от типа долота и вида вооружения (основное или калибрующее) преобладает один из видов изнашивания.

Комбинированные (твердый сплав – сталь) зубки, изготовленные МТФ, могут эксплуатироваться в различных условиях, поэтому возникает задача исследовать влияние технологии МТФ на микроструктуру и физико-механические свойства твердого сплава с целью определения параметров технологии МТФ для конкретных условий работы.

Для исследования влияния технологии МТФ на микроструктуру твердого сплава были изготовлены комбинированные изделия в виде зубков формы Г26 по ГОСТ 880-75 для шарошек буровых долот (см. рис.1, а). Использовались твердые сплавы ВК8-В, ВК10-КС по ГОСТ 3882-74. Основание комбинированного зубка изготавливалось из стали 45 по ГОСТ 1050-88. Для изготовления комбинированных зубков применялась одно- и двухстадийная технология механотермического формирования.

Двухстадийная технология механотермического формирования заключается в спекании под давлением в керамической пресс-форме порошка твердого сплава при одновременном его соединении со стальным основанием за счет теплоты, выделяемой при пропускании электрического тока, с использованием медного, а затем графитового электрода-пуансона (см. рис. 1, б). Параметры процесса: давление прессования 25 - 50 МПа, плотность тока 8 - 20 А/мм<sup>2</sup>, время процесса 5 - 7 с для каждой стадии.

При одностадийной технологии механотермического формирования спекание осуществляется под давлением в графитовой пресс-форме за счет прохождения электрического тока через порошок твердого сплава, стальное основание и пресс-форму (см. рис. 1, в). Давление прессования составляет 9 МПа, плотность тока 4 - 5 А/мм<sup>2</sup>, длительность процесса от 10 до 600 с.

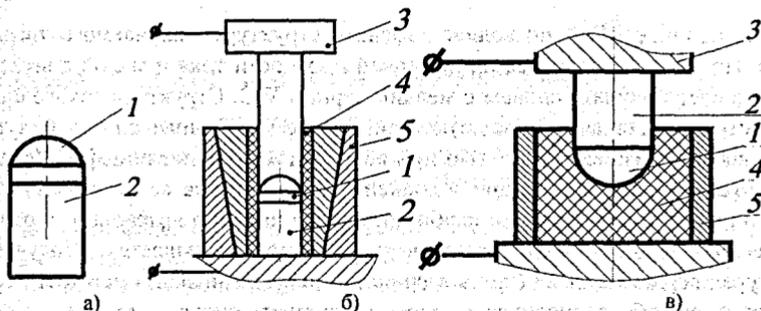


Рисунок 1 – Комбинированный зубок (а) формы Г26 по ГОСТ 880-75 и схема его изготовления МТФ с использованием медного электрода-пуансона (б) и с использованием графитовой пресс-формы (в) (1 – твердый сплав, 2 – стальное основание зубка, 3 – медный электрод-пуансон, 4 – керамическая или графитовая пресс-форма, 5 – стальная оправка)

Комбинированные зубки изготавливались на экспериментальной установке РГУНГ им. И. М. Губкина (г. Москва).

Исследование микроструктуры твердых сплавов проводилось по ГОСТ 9391-80. Определение стереологических параметров твердых сплавов (среднего размера карбидных зерен, среднего размера участка  $Co$ -фазы, смежности карбидных зерен), а также объемных долей кобальтовой и карбидной фаз проводилось по методике, изложенной в [3].

Для твердого сплава определялись твердость по Роквеллу, плотность, коэрцитивная сила в соответствии со стандартной методикой по ГОСТ 20017-74; ГОСТ 20018-74, ГОСТ 24916-81. При определении плотности и коэрцитивной силы твердосплавная часть зубка отделялась от стального основания.

Технология МТФ оказывает существенное влияние на микроструктуру твердого сплава. В твердом сплаве после двухстадийного МТФ отсутствуют включения графита, однако в некоторых случаях обнаруживаются включения  $\eta_1$ -фазы (двойной карбид вольфрама и кобальта) у границы со сталью. Их наличие вызвано обезуглероживанием сплава вследствие диффузии углерода в сталь и высокой скоростью охлаждения после МТФ. Анализ стереологических параметров твердого сплава, изготовленного двухстадийным МТФ, показывает, что средний размер карбидных зерен, средняя величина кобальтовой прослойки меньше, а смежность карбидных зерен больше, чем у сплава той же марки, изготовленного одностадийного МТФ или свободным спеканием (см. табл. 1).

Таблица 1 - Микроструктура твердых сплавов

Марка сплава	Технология изготовления	Средний размер зерен WC $d_{WC}$ , мкм	Средний размер участка $Co$ -фазы $l_{Co}$ , мкм	Смежность зерен WC $C_{WC-WC}$
BK8-B	Свободное спекание	4,2	1,6	0,54
	Двухстадийное МТФ	2,7	0,9	0,61
	Одностадийное МТФ	4,2	1,5	0,55
BK10-KC	Свободное спекание	4,3	1,9	0,40
	Двухстадийное МТФ	1,7	0,7	0,60
	Одностадийное МТФ	4,2	1,9	0,41

Одностадийное МТФ позволяет изменять структуру получаемого твердого сплава. Проведение процесса при высокой плотности тока и малой длительности позволяет получать сплавы с мелким зерном WC. Структура такого сплава близка структуре сплава после двухстадийного МТФ. Данные сплавы будут обладать высокой износостойкостью при абразивном изнашивании [1]. Увеличение длительности процесса при меньшей плотности тока ведет к росту зерен WC. При этом средний размер карбидных зерен линейно возрастает, а относительная доля контактной поверхности линейно уменьшается. Получаемая структура твердого сплава (крупнозернистый сплав с низкой смежностью карбидных зерен) обеспечивает высокую пластичность сплава, что должно повысить его долговечность при ударном нагружении [2]. При этом средний размер карбидных зерен линейно возрастает, а их смежность - линейно снижается. Однако при длительности процесса более 600 секунд содержание графита в сплаве превышает допустимые пределы.

В результате исследования физико-механических характеристик твердого сплава было установлено, что твердый сплав, полученный двухстадийным механотермическим формированием, имеет более высокую твердость (на 2 - 2,5 единицы HRA), плотность и коэрцитивную силу, чем сплав, изготовленный одностадийным МТФ. Повышение твердости можно объяснить меньшим размером карбидных зерен и кобальтовой прослойки между зернами, а также уменьшением массовой доли кобальта в поверхностном слое вследствие его диффузии в графитовый электрод-пуансон на второй стадии МТФ. Физико-механические свойства твердого сплава, изготовленного одностадийным механотермическим формированием, практически не отличается от параметров сплава, полученного свободным спеканием.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что для обеспечения требуемых в соответствии со стандартами микроструктуры и физико-механических свойств твердого сплава, необходимо использовать одностадийную технологию МТФ в графитовой пресс-форме с длительностью процесса от 50 до 200 секунд. Изготовленные по данной технологии твердые сплавы обладают способностью воспринимать большие ударные нагрузки не разрушаясь, а также имеют необходимую твердость. Для обеспечения высокой износостойкости при абразивном изнашивании необходимо использовать твердые сплавы, изготовленные двухстадийным МТФ, который обеспечивает мелкозернистую структуру сплава, малую величину среднего размера кобальтовой фазы и более высокую твердость поверхностного слоя.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Долговечность шарошечных долот / Н.А. Жидовцев, В.Я. Кершенбаум, Э.С. Гинзбург [и др.]. - М.: Недра, 1992. - 271 с.
2. Лошак, М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. - Киев: Наук. думка, 1984. - 328 с.
3. Чернявский, К.С. Стереология в металловедении. - М.: Металлургия, 1977. - 280 с.

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ЗУБООБРАБОТКИ

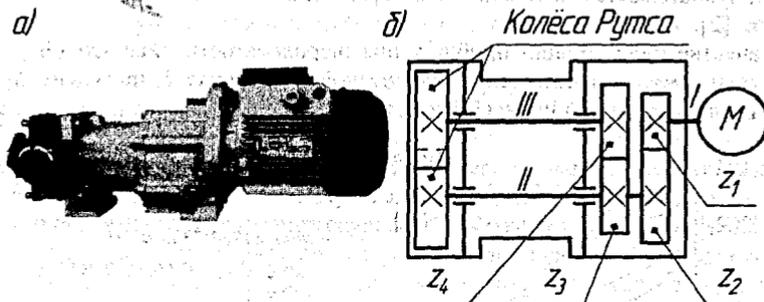
Григорьев В.Ф., Дакало Ю.А.

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Важнейшей проблемой машиностроения на современном этапе является повышение экономичности производства без потери качества продукции.

Отсутствие научного подхода к назначению качественных параметров рабочих поверхностей деталей может приводить к необоснованному завышению требований, а следовательно, и удорожанию выпускаемых машин без должного повышения их надежности. С увеличением выпуска конкурентоспособной продукции машиностроения стимулируется поиск и внедрение экономичных и производительных методов обработки.

Для повышения долговечности пар трения обычно стараются уменьшить их приработку в процессе эксплуатации, добиваясь финишной обработкой близкой к оптимальной равновесной шероховатости. Заслуживает внимания и более экономичный подход, связанный с переносом финишных операций на этап приработки деталей [1]. Такой подход позволяет в обоснованных случаях исключить из технологического процесса дорогостоящие отделочные операции, повысить производительность и снизить затраты на изготовление машин.



а – общий вид; б – схема кинематическая принципиальная  
Рисунок 1 - Насос роторный В3-ОР2-А-2

При изготовлении роторных насосов серий НМ, НР, В3-ОР2-А-2 (рисунок 1, а) с целью повышения экономичности изготовления синхронизирующих зубчатых колёс  $z_3, z_4$  (рисунок 1, б) была предложена замена зубошлифования более производительным и дешёвым методом обработки: точным зубофрезерованием с последующей приработкой в процессе эксплуатации. Технические мероприятия по повышению экономичности технологии обработки состояли в исключении зубошлифования из техпроцесса, применении более точных червячных фрез, замене закалки ТВЧ, предшествующей абразивной обработке, улучшением.

Снижение твёрдости до HB 269...302 (HRC 28...33) позволило применить однократное фрезерование более точной фрезой повышенной производительности класса AA - 2510-4014 AA P18 ГОСТ 9324-80, обеспечивающей седьмую степень точности по трем нормам. При этом окончательная отделка для достижения эксплуатационной шероховатости переносится на этап приработки.

Кроме этого, было предложено исключение из технологического процесса плоскошлифовальной операции торцевой поверхности колёс, сокращение числа контрольных операций с восьми до шести, а также слесарных с девяти до семи. В результате предложенных изменений технологии штучно-калькуляционное время изготовления колёс сократилось с 64,08 до 44,03 минут (на 31%).

После изготовления зубчатых колёс и сборки роторных насосов производилась начальная приработка на заводском испытательном стенде под рабочей нагрузкой в течение 2,5 часов. При этом контролировался уровень шума при работе насосов, который во всех случаях не превышал допустимого значения 80 дБА.

Затем после разборки изделия производилось измерение параметров шероховатости эвольвентной поверхности зубьев для оценки приемлемости предлагаемых изменений. Измерение шероховатости производилось портативным прибором для профильного измерения шероховатости TR200 (Time Group Inc.).

В результате измерений были получены следующие численные значения параметра шероховатости  $R_a$  эвольвентных поверхностей зубьев: шлифованных колёс до приработки  $Ra_{3,3 \pm 20\%}$ , после –  $Ra_{2,5 \pm 13\%}$ ; фрезерованных колёс до приработки  $Ra_{5,3 \pm 28\%}$ , после –  $Ra_{3,4 \pm 20\%}$ . Таким образом, фрезерованное колесо прирабатывается интенсивнее по сравнению с закалённым шлифованным колесом [2].

В качестве иллюстрации приближения шероховатости, полученной различными методами, к оптимальной равновесной на рисунке 2 приведены кривые относительной опорной длины профиля  $t_p$ .

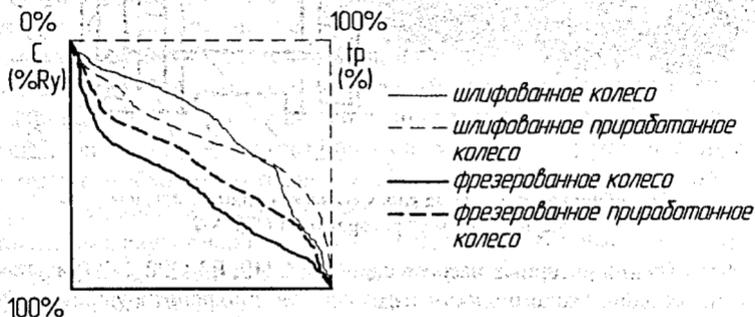


Рисунок 2 - Кривые относительной опорной длины профиля  $t_p$

Как видно из рисунка, в верхней, «рабочей» части кривой, значение  $t_p$  как для шлифованных, так и фрезерованных приработанных колёс закономерно увеличивается, то есть, имеется тенденция приближения к форме теоретической кривой для равновесной шероховатости.

С целью проверки ресурса зубчатых колёс, изготовленных по новой технологии и имеющих меньшую твёрдость, был произведён расчёт на прочность и долговечность активных поверхностей зубьев до и после изменения техпроцесса. Рассчитывались контактные напряжения на активных поверхностях зубьев и сравнивались с допустимыми значениями, при которых будет обеспечен требуемый уровень прочности и долговечности колёс. Были получены следующие значения контактных напряжений: для шлифованного колеса  $\sigma_H=397,9$  МПа <  $[\sigma_H]=1586,3$  МПа, для фрезерованного -  $\sigma_H=397,8$  МПа <  $[\sigma_H]=704,4$  МПа.

Следовательно, даже при меньшей твёрдости и большей исходной шероховатости эвольвентных поверхностей зубчатых колёс прогнозируется заданный срок службы.

При этом себестоимость изготовления одного зубчатого колеса составила: для шлифованного колеса -  $C=61225$  бел. руб., для фрезерованного -  $C=27325$  бел. руб. [3]. Таким образом, себестоимость изготовления зубчатых колёс снизилась на 55%.

Вместе с тем, по причине снижения твёрдости зубьев следует ожидать уменьшения срока службы колёс, изготавливаемых по новой технологии. Для комплексной оценки эффективности принятых изменений было рассчитано отношение себестоимости изготовления колёс по вариантам технологического процесса к ресурсу передачи:

$$K_{CL}=C/L_h, \text{ руб./ч,} \quad (1)$$

где  $C$  - себестоимость изготовления одного колеса, руб.;

$L_h$  - ресурс передачи, ч.

Расчётный ресурс передачи составил: для шлифованного колеса - 8833 ч., для фрезерованного - 5361 ч.

Подставив численные значения величин в формулу (1), получим следующие значения: для шлифованного колеса -  $K_{CL}=6,9$  бел. руб./ч, для фрезерованного -  $K_{CL}=5,1$  бел. руб./ч.

Таким образом, себестоимость изготовления фрезерованного зубчатого колеса, отнесённая к одному часу срока службы, меньше, чем шлифованного колеса на 26%, что подтверждает экономическую целесообразность принятых решений.

Предложенные трудосберегающие изменения технологического процесса изготовления синхронизирующих зубчатых колёс роторных насосов внедрены на машиностроительном предприятии.

На основании результатов исследований можно сделать вывод, что в обособленных случаях замена зубошлифования приработкой повышает экономичность технологии зубообработки.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Сулов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Сулов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
- 2 Григорьев, В.Ф. Обоснование замены отделочной обработки эвольвентных зубьев приработкой / В.Ф. Григорьев, Ю.А. Дакало, Ю.И. Плющев. // Вестник БрГТУ. – Брест: Издательство БрГТУ, 2012. – С. 109-112.
- 3 Гамрат-Курек, Л.И.. Экономика инженерных решений в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.: ил.

## ТОЧНОСТЬ ВЕСОВЫХ ДОЗИРУЮЩИХ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

*Сечко Д.С., Григорьев В.Ф.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Дозирование материалов играет важную роль в производствах цементной, металлургической, горнодобывающей, химической, комбикормовой промышленности, где качество и себестоимость производимой продукции непосредственно зависят от производительности и точности дозирования. Дозатор - устройство для автоматического отмеривания (дозирования) заданных массы или объема жидких или сыпучих материалов. Поскольку многие технологические процессы основываются на определенной массе исходных элементов, учет использованного сырья, обеспечений необходимого объема или массы, поддержании требуемого расхода продукта, то дозирующие системы находят обширное применение.

В настоящее время высокая точность дозирования может быть достигнута при значительном снижении производительности, что в условиях крупного производства с большими объемами дозируемого материала неприемлемо [1]. Альтернативой может быть применение быстродействующих, но дорогостоящих весоизмерительных систем.

Теоретические исследования в области дозирования, имеющиеся в настоящее время, не позволяют получить однозначного ответа о возможностях повышения точности и производительности дозирования на имеющемся дозирующем оборудовании, обеспечиваемых за счет оптимизации режима дозирования. Также не имеет однозначного решения обратная задача: определение необходимой точности элементов дозирующей системы для обеспечения заданных точности и производительности дозирования [2].

Таким образом, важной задачей повышения рентабельности и конкурентоспособности производств, использующих в своих технологических цепочках дозирующие системы непрерывного действия, является повышение точности без снижения производительности таких систем.

При непрерывном весовом дозировании (рисунок 1) поток материала, выходящий из питателя 1, непрерывно взвешивается. В питатель материал поступает из бункера. В зависимости от результатов взвешивания автоматически с помощью регулятора 3 корректируется производительность питателя. Измерение массы происходит при помощи весового устройства 2, в качестве которого часто применяют тензометрические датчики.

Под точностью понимают свойство дозаторов давать показание (осуществлять дозирование), близкое к истинной массе (производительности). Количественно точность оценивается допускаемой погрешностью.

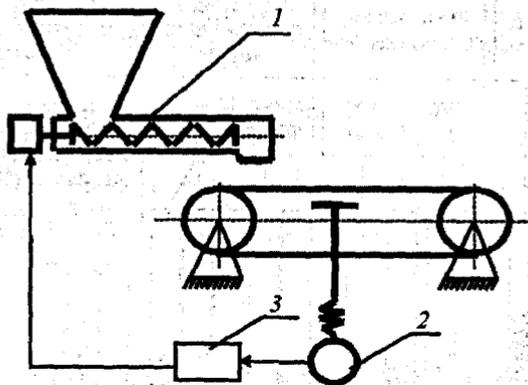


Рисунок 1 – Принципиальная схема весового дозатора непрерывного действия

Погрешность дозирования можно выразить как разность фактически прошедшего количества материала через весоизмерительную систему  $Q_{\text{факт}}$  и реальной массы того же материала  $Q_p$ . В процентном соотношении погрешность дозирования определяют:

$$\Delta = \frac{Q_p - Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{факт}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

При повышении точности дозирования с распространенных 5% до 3% и массе прошедшего через дозирующую систему материала в 100 т полезный эффект составит 1,85 т. Данный пример показывает необходимость работы над повышением точности весовых дозирующих систем непрерывного действия.

Погрешность дозирования формируется из многих факторов, зависящих от самого дозирующего устройства и его конструкции (рисунок 2): – неточность изготовления, установки элементов дозатора, неточность элементов привода; факторов, зависящих от источника энергии – отклонения напряжения от номинального значения; факторов, зависящих от дозируемого материала – отклонения температуры, давления, химический состав, вещественный состав, granulometric состав [3].

Одним из наиболее перспективных направлений в совершенствовании дозирующих систем непрерывного действия и повышения точности измерения является разработка конструкций, которые обеспечат необходимое соотношение производительности и точности дозирования при минимизации негативного влияния на весоизмерительную систему.

Так, при использовании ленточного питателя весовой датчик через ролик воспринимает вертикальную составляющую  $F_{\text{вер}}$  силы  $F$ , хотя часть нагрузки передается горизонтальной составляющей  $F_{\text{гор}}$  (рисунок 3).

При неравномерном распределении нагрузки на ленте возрастание  $F_{\text{гор}}$  приводит к искажению показаний датчика и увеличению погрешности всей весоизмерительной системы.

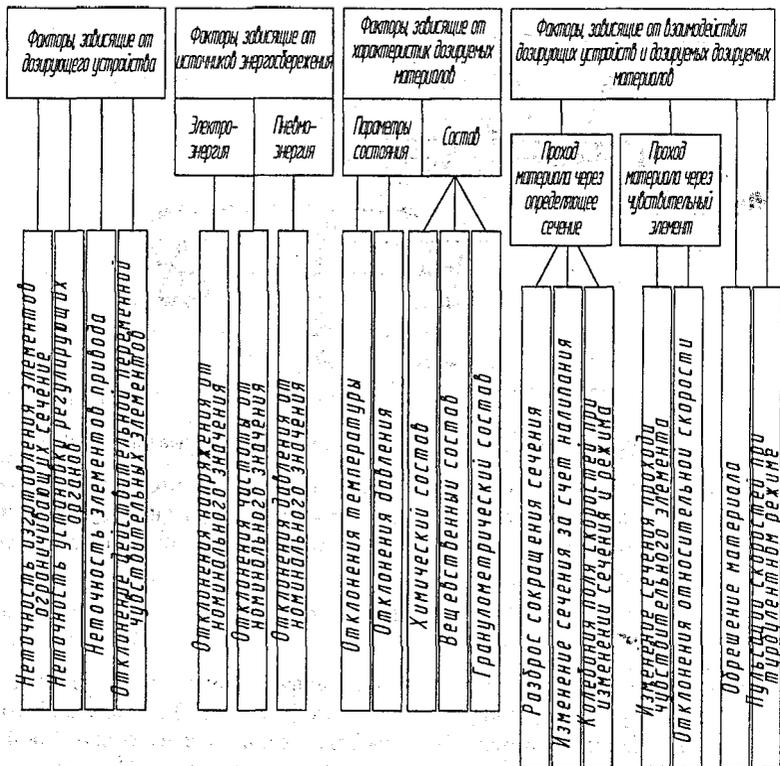


Рисунок 2 – Факторы, влияющие на точность дозатора

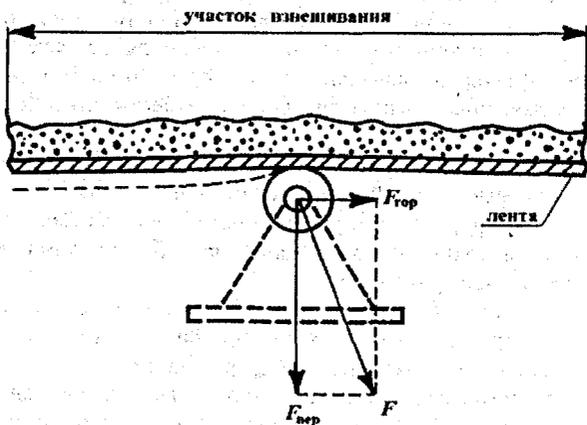


Рисунок 3 – Силы, действующие на весоизмерительный ролик

Следовательно, совершенствование конструкции дозирующих систем, а также обеспечение равномерности восприятия нагрузки весоизмерительной системой дозирующего устройства является важной задачей и перспективным путем повышения точности дозирования.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Весовое дозирование зернистых материалов / С. В. Першина [и др.]. – М.: Машиностроение, 2009. – 260 с.
2. Грибков, А.А. Автоматизация и управление высокоточным порционным дозированием порошковых материалов: автореф. дис. доктора техн. наук / А.А. Грибков. – М., 2011. – 40 с.
3. Видинеев, Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия / Ю.Д. Видинеев. – М.: Энергия, 1978. – 184 с.

УДК 621

## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ В УСЛОВИЯХ ГИДРОАБРАЗИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

*Ялковский Н.С.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Интенсивному гидроабразивному износу подвергается оборудование в цементной, энергетической, абразивной, металлургической промышленности и других отраслях, связанных с дроблением, измельчением, резкой и транспортировкой сырья и материалов.

Перспективным методом повышения долговечности оборудования, работающего в таких условиях, является формирование на изнашиваемых поверхностях различного рода защитных покрытий, в том числе газотермических покрытий из керамических материалов.

Вместе с тем особенности гидроабразивного изнашивания покрытий данного типа еще недостаточно изучены.

В данной работе исследовались свойства плазменного покрытия из механической смеси оксидов алюминия  $Al_2O_3$  и титана  $TiO_2$ . Рассматривались покрытия с 2, 8, 14 и 20 % оксида титана в составе.

Покрытие формировалось из порошков зернистостью 40 мкм на установке плазменного напыления швейцарской фирмы "Плазма-Техник АГ". В качестве плазмообразующего газа использовался азот.

Напыление производилось на образцы, выполненные из стали 40, имеющие форму диска с размерами: диаметр - 50 мм, высота - 10 мм.

Для увеличения прочности сцепления напыляемого покрытия с поверхностью образца использовался подслои из алюминид никеля ( $NiAl$ ) толщиной 0,1 мм. Перед напылением поверхность образца для повышения прочности сцепления с покрытием подвергалась дробеструйной обработке.

Толщина защитного покрытия составляла 0,4 мм, его микротвердость 11000 МПа.

Определение износостойкости покрытия производилось на установке роторного типа с вращающимися образцами.

Поверхность образца, подвергаясь абразивному изнашиванию, имела площадь 12 см<sup>2</sup>. Использовалась весовая методика определения величины износа. Определение массы образцов до и после испытаний производилось на аналитических весах модели ВЛА-200-М, которые обеспечивают взвешивание образцов массой до 200 г с точностью 0,0001 г.

Определялся объемный износ защитного покрытия, при этом плотность покрытия в соответствии с [1] принималась равной 3,4 г/см<sup>3</sup>.

Полученные результаты сравнивались с величиной гидроабразивного износа стали 40, принятой в качестве эталона.

Рассматривалось влияние на абразивное изнашивание факторов, которые могут привести к инверсии (изменению) ряда износостойкости. К числу последних относятся: угол взаимодействия абразивного потока с поверхностью изнашиваемого материала ( $\alpha$ ) и коэффициент твердости.

Угол взаимодействия ( $\alpha$ ) – один из основных параметров, определяющих характер изнашивания. При значениях  $\alpha$ , близких к 90°, в поверхностных слоях материала реализуются процессы, аналогичные процессам, происходящим при ударно-абразивном изнашивании. В этом случае в зависимости от характеристик материала и интенсивности внешнего воздействия преобладают полидеформационное, усталостное разрушение или выкрашивание. Когда угол  $\alpha$  близок к 0°, гидроабразивное изнашивание аналогично изнашиванию в условиях скольжения по абразиву. При этом разрушение материала протекает преимущественно в результате микрорезания и деформирования с образованием коротких царапин.

В рассматриваемой работе величина угла  $\alpha$  имеет значения 20° и 80°.

Коэффициент твердости представляет собой отношение твердости абразивных частиц к твердости изнашиваемого материала. Для того чтобы получить предельную характеристику износостойкости покрытия, использовался абразив, твердость которого значительно (в 1,3...1,7 раза) превышает твердость покрытия. Учитывая, что твердость покрытия составляет 11000 МПа, в качестве абразивного материала принимаем электрокорунд твердостью 18000 МПа.

Остальные факторы, определяющие интенсивность изнашивания поддерживались в процессе испытаний на постоянном уровне:

- скорость гидроабразивного потока - 52 м/мин.;
- размер абразивных зерен - 0,315...0,4 мм.;
- концентрация абразива в потоке - 30...35 %.
- испытания проводились в нейтральной среде.

Результаты измерений и расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Объемный износ и относительная износостойкость плазменных покрытий из смеси оксидов алюминия и титана

Содержание TiO <sub>2</sub> в покрытии	Объемный износ, мм <sup>3</sup> /час		Относительная износостойкость	
	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 80^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 80^\circ$
2%	0,98	1,51	0,40	0,22
8%	0,86	1,43	0,46	0,23
14%	0,78	1,29	0,50	0,26
20%	0,94	1,33	0,44	0,25

Таким образом, гидроабразивная износостойкость плазменных покрытий из механической смеси оксидов алюминия и титана невысока и в зависимости от условий воздействия абразивного потока составляет 0,40 - 0,50 при угле взаимодействия 20° и 0,22 - 0,26 при угле взаимодействия 80°. Этот факт определяется особенностями строения плазменного покрытия, а именно:

1. Высоким уровнем остаточных напряжений в материале покрытия.
2. Высокой хрупкостью керамического покрытия.
3. Наличием в покрытии большого числа пор, которые уменьшают прочность материала и служат концентраторами напряжений при разрушении.
4. Невысокой прочностью сцепления между частицами покрытия, так как взаимодействие между частицами покрытия вследствие скоротечности его формирования ограничивается только химическими связями.

Как свидетельствуют полученные результаты, покрытия данного типа не могут использоваться для эффективной защиты в условиях гидроабразивного изнашивания.

Сообщения об их применении, по видимому, относятся к случаю абразивного изнашивания в агрессивных средах, когда помимо абразивного воздействия имеет место интенсивное разупрочняющее воздействие среды. В этом случае керамические покрытия в силу своей высокой химической стойкости действительно эффективны.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов (справочник) / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская К. Наукова думка, 1987. 544 с.

УДК 620

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ И ЕЕ ОПЫТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ ХВГ

*Добрянин Ю.А.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Технологической наследственностью называется перенесение на готовое изделие в процессе его обработки погрешностей, механических и физико-химических свойств исходной заготовки или свойств и погрешностей, сформировавшихся у заготовки на отдельных операциях изготовления изделий [1].

Обычно технологическая наследственность рассматривается ограничительно на последней завершающей операции, хотя формируется она во время протекания всего технологического процесса. Известно, что она представляет собой явление переноса свойств заготовок, деталей и их сборки от всех технологических переходов и операций между собой; как взаимное технологическое воздействие, которое сказывается при эксплуатации на показатели качества изделия [2]. При этом сила воздействия технологических факторов на эксплуатационные свойства будет различной. Влияние одних может усиливаться, других —

ослабевать. Можно отметить существование своеобразных барьеров, которые по-разному преодолеваются разными факторами. К таким барьерам можно отнести термические и упрочняющие операции, выхаживание при шлифовании и т.п. Наибольший интерес представляет влияние операций поверхностного упрочнения деталей на ослабление воздействия вредных факторов технологической наследственности [3]. Так, например, поверхностный наклеп устраняет микротрещины, выравнивает физико-механические свойства, структурные неоднородности, устраняет повышенные напряжения, концентраторы напряжений и т.п. Поэтому при разработке технологических процессов должны вводиться операции, препятствующие воздействию вредных факторов.

При изготовлении изделий главное внимание уделяется технологическому обеспечению эксплуатационных свойств деталей и их соединений. Под главными эксплуатационными свойствами деталей и их соединений понимается контактная жесткость, износостойкость, прочность посадок, коррозионная стойкость и динамическая контактная прочность, фреттингстойкость, теплопроводность. Технологическое обеспечение и повышение износостойкости деталей достигается технологическим определением оптимальных параметров качества поверхностного слоя в соответствии с условиями эксплуатации. Для этого применяется отделочно-упрочняющая обработка, в особенности новые методы поверхностно-пластической деформации, например, электромеханическая обработка и т.п. Основной упрочнения поверхности является сочетание термического и силового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали [4].

Следующим способом повышения износостойкости является нанесение специальных покрытий. Технологическое обеспечение и повышение герметичности соединений проводится путем назначения требуемых параметров контактных поверхностей, которые обеспечивают нужную герметичность, а затем разработкой технологического процесса, что позволит получить указанные параметры.

Основным способом обработки различных конфигураций уплотнительных поверхностей являются точение, шлифование и притирка. При этом большое значение имеет влияние направления и параметры микронеровностей (поперечный, продольный, косой), форма контактных поверхностей, схемы их контакта.

Технологическое обеспечение и повышение коррозионной стойкости деталей проводится за счет создания соответствующего качества поверхностных слоев при механической и термической обработке с использованием ингибиторов коррозии и различных защитных металлических и неметаллических покрытий. При этом коррозионная стойкость деталей зависит как от качества поверхностного слоя, так и свойств коррозионной среды, условий коррозии, вида используемого ингибитора (вещество, замедляющее процесс), его концентрации, вида покрытия, его качества.

Технологическим обеспечением и повышением прочности соединений с натягом можно управлять за счет изменения коэффициента трения в посадке и геометрических параметров сопрягаемых поверхностей деталей. Повышение прочности соединений достигается разными способами и методами, одним из которых является вибронакатывание деталей с получением винтовых микрошлифов. Изменением режимов процесса можно технологически управлять

прочностью соединений. Вибронакатывание повышает прочность прессовых соединений на 20% по сравнению со шлифованием [5].

Большое влияние на величину крутящего момента имеет также усилие вибронакатывания и диаметр шариков.

В общем можно отметить влияние часто используемой лезвийной и абразивной обработки на эксплуатационные свойства деталей. Основными технологическими факторами, которые определяют такое влияние, является подача и жесткость технологической системы, при алмазно-абразивной – подача и зернистость, а при пластической – рабочее давление и приведенный радиус инструмента. Наибольшими возможностями повышения эксплуатационных свойств деталей наделены методы отделочно-упрочняющей обработки поверхностно-пластической деформацией.

Технологическая наследственность зависит не только от вида и режимов обработки, примененных на чистовой операции. Она может проявиться в изменении свойств или потери точности формы готовой детали при ее эксплуатации в результате воздействия тех или иных элементов состояния поверхностного слоя, созданных в поверхностном слое детали при ее черновой обработке.

Была поставлена следующая задача: выяснить, как будет изменяться твердость поверхностного слоя образцов из стали ХВГ (инструментальная сталь повышенной прокаливаемости) в зависимости от режимов обработки при точении.

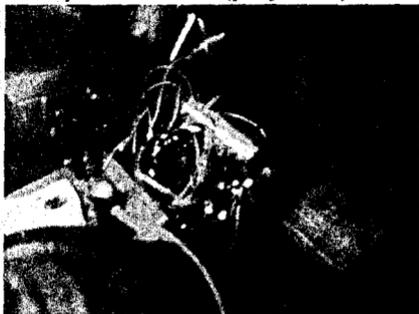
Данная сталь характеризуется повышенным содержанием марганца, при нормальном содержании кремния (таблица 1). Это приводит при закалке к увеличению количества остаточного аустенита и уменьшению деформации.

Инструмент из этих сталей закаливается в масле (при ступенчатой закалке – в соли) и прокаливается насквозь. Меньшая скорость охлаждения при закалке уменьшает опасность образования трещин, деформации и коробления, к чему склонны углеродистые инструментальные стали. Это очень важно для многих видов инструментов, имеющих сложную конфигурацию.

Таблица 1 – Химический состав стали ХВГ

Массовая доля элементов, %				
C	Mn	Si	Cr	W
0,9-1,0	0,8-1,0	0,15-0,35	0,9-1,2	1,2-1,6

Для проведения эксперимента было подготовлено два образца на токарно-винторезном станке (рисунок 1).



Образец № 1 (рисунок 2) был обработан при следующих режимах резания:  $n = 910$  мин.<sup>-1</sup>;  $t = 0,5$  мм;  $s = 0,608$  мм/об; аналогично для образца № 2 (рисунок 3) режимы резания были следующие:  $n = 910$  мин.<sup>-1</sup>;  $t = 0,5$  мм;  $s = 0,106$  мм/об.

Рисунок 1 – Обтачивание и обработка торцов впоследствии исследуемых образцов

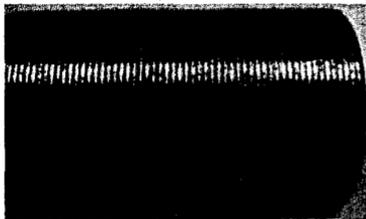


Рисунок 2 – Образец №1

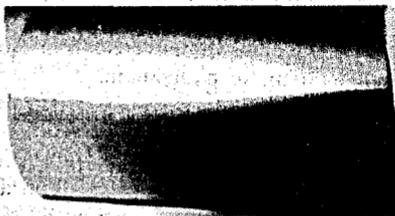


Рисунок 3 – Образец №2

Твердость образцов до закалки измеряли при помощи твердомера ТКМ 459. Полученные результаты сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Твердость образцов до закалки

	Образец № 1	Образец № 2
Твердость по периферии, <i>HRC</i> ,	24,8	22,4
Твердость по торцу, <i>HRC</i> ,	23	25,9

Закалку проводили при следующих режимах: температура закалки – 830° С, с выдержкой в печи в течение 30 мин., охлаждением в масле, с последующим

низким отпуском при температуре 150° С и охлаждением на воздухе. В итоге была получена следующая микроструктура стали ХВГ (мартенсит с темными мартенситными иглами и остаточными карбидами различных размеров).

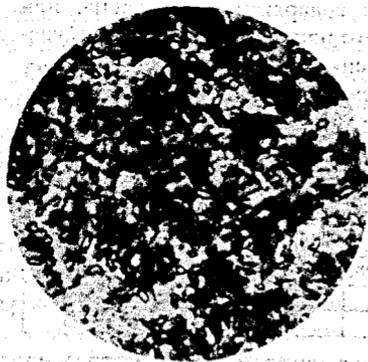


Рисунок 4 – Микроструктура стали ХВГ (увеличено x1000)

Твердость образцов после закалки и отпуска сведем в таблицу 3.

Таблица 3 – Твердость образцов после закалки и низкого отпуска

	Образец № 1	Образец № 2
Твердость по периферии, <i>HRC</i> ,	56,3	55,4

Далее исследуемые образцы были шлифованы на круглошлифовальном и плоскошлифовальном станках без применения СОЖ, с последующим измерением твердости (таблица 4).

Таблица 4 – Твердость образцов после шлифования

	Образец № 1	Образец № 2
Твердость по периферии, <i>HRC</i> ,	62	60,5
Твердость по торцу, <i>HRC</i> ,	61,1	60,2

В итоге, по результатам эксперимента, можно сделать следующий вывод: при шлифовании грубо обточенной и закаленной до 54-56 HRC, заготовки из стали ХВГ шлифовальный круг создает на участках выступов неровностей поверхности тепловые удары, вызывающие мгновенный нагрев и структурные изменения металла поверхностного слоя, что вызывает вторичную закалку поверхностного слоя исследуемых образцов, и ведет к значительному увеличению твердости поверхностного слоя (таблица 4).

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Качество машин: Справочник в 2 т. / А.Г. Суслов [и др.]; под общей ред. А.Г. Суллова. – М.: Машиностроение. – 1995. – 430 с.
2. Суслов, А.Т. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / Суслов, А.Т. [и др.]. – М.: Машиностроение. – 2006. – 448 с.
3. Васильев, А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / Васильев А.С. [и др.]; под ред. А.И. Кондакова. – М.: Машиностроение. – 2005. – 352 с.
4. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / Суслов А.Г., Польский А.М.. – М.: Машиностроение. – 2002. – 640 с., ил.
5. Машиностроение. Энциклопедия. Технология сборки в машиностроении / А.А. Гусев [и др.]; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева – М.: Машиностроение. – 2001. Т.5 – 640 с, ил.

УДК 621.778

### УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОДНОКОРПУСНОЙ ЗАВАРИВАТЕЛЬ МАГИСТРАЛЕЙ КОНТЕЙНЕРОВ ПЕРЕЛИВАНИЯ КРОВИ

*Рубаник В.В.<sup>1</sup>, Луцко В.Ф.<sup>1</sup>, Шурмелевич Д.Д.<sup>1</sup>, Попова О.С.<sup>1,2</sup>*

- 1) Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Республика Беларусь;
- 2) Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь

Реальный прогресс в области здравоохранения во многом связан с совершенствованием деятельности службы крови. Высокая эффективность инфузионно-трансфузионной терапии при многих видах патологии, особенно при выведении организма из терминальных состояний, способствовали тому, что развитие службы крови является одним из приоритетных направлений практической медицины.

Широкое применение препаратов крови обуславливает специальные требования и особенности их сбора и хранения. Исключение из технологии заготовки и переработки крови стеклянной тары и повсеместное применение пластиковых контейнеров (гемоконтейнеров) потребовало перевооружения всей материально-технической базы станций и отделений переливания крови. При этом, одной из основных проблем является необходимость надежной герметизации пластиковых контейнеров.

Известно, что одним из наиболее эффективных, надежных, малознергоемких и наиболее широко используемых для соединения полимерных материалов способов является ультразвуковая сварка.

В ГНУ «ИТА НАН Беларуси» для герметизации гемоконтейнеров разработан аппарат для ультразвуковой сварки магистралей систем переливания крови [1]. В настоящее время он широко используется на станциях переливания крови в Республике Беларусь. В процессе эксплуатации указанного аппарата была выявлена необходимость его дальнейшей доработки. Аппарат имел двухмодульную конструкцию, низкую ремонтпригодность, значительные массогабаритные размеры.

В связи с этим на базе вышеуказанного аппарата была разработана однокорпусная конструкция, представленная на рисунке 1.

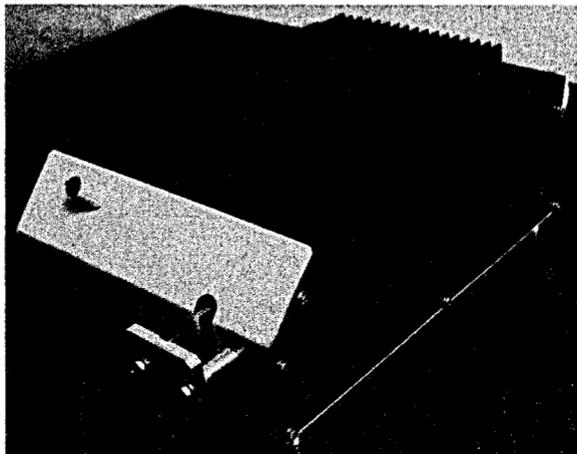


Рисунок 1 – Общий вид однокорпусного аппарата для ультразвуковой сварки магистралей систем переливания крови

Ультразвуковой сварочный модуль (рисунок 2) работает следующим образом.

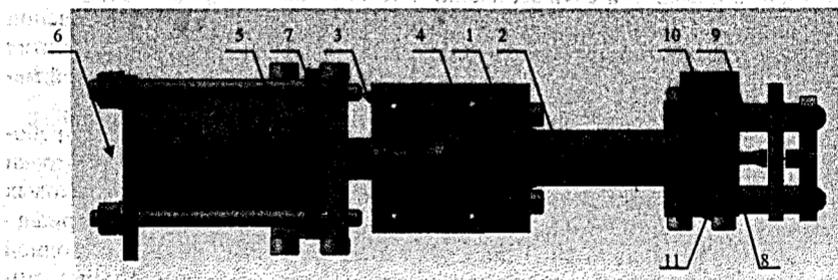


Рисунок 2 – Конструкция сварочного ультразвукового модуля заваривателя магистралей контейнеров переливания крови

При опускании полимерной трубки 11 в рабочую зону, расположенную между торцевыми поверхностями волновода 2 и акустической опоры 8, происходит

закрывание управляющего контакта (не показан), который подаёт сигнал начала процесса запайки. Включается электромагнит 6, и шток 7 электромагнита начинает перемещаться, приводя в движение по направляющей рельсе 5 каретку 3 вместе с расположенными на ней пьезокерамическим преобразователем 1 и волноводом 2. Полимерная трубка при этом сжимается по направлению к рабочему торцу акустической опоры 8. Автоматически включается ультразвуковой генератор (не показан), электрические колебания от которого поступают на пьезоэлектрический преобразователь. Последний обеспечивает преобразование электрических колебаний ультразвуковой частоты в механические той же частоты. Колебания поступают на волновод, рабочий торец которого осуществляет ввод колебаний в полимерную трубку. Ультразвуковые колебания поглощаются материалом полимерной трубки, что приводит к её нагреву, переходу в вязкопластичное состояние и соединению двух противоположных стенок полимерной трубки (рисунк 3).

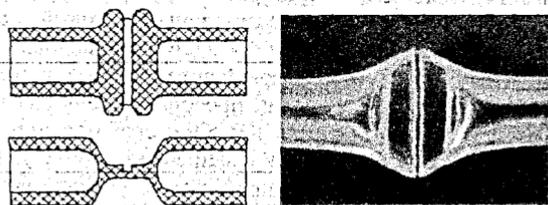


Рисунок 3 – Вид сварного соединения полимерной трубки

Выполненный на рабочей поверхности акустической опоры 8 режущий элемент 10 формирует надрез для разделения полимерной трубки на два герметичных участка. После отключения ультразвукового генератора статическое давление, сжимающее полимерную трубку, сохраняется в течение одной секунды для охлаждения и стабилизации свойств сформированного шва. По истечении заданного времени автоматически отключается электромагнит 6, и шток 7 возвращает каретку 3 в исходное состояние. Загерметизированные контейнер и полимерная трубка удаляются из рабочей зоны.

Структурная схема заваривателя (рисунок 4) включает задающий генератор ЗГ, с которого сигнал ультразвуковой частоты через регулятор мощности РМ подаётся на усилитель мощности УМ. В исходном состоянии усилитель мощности УМ и электромагнит ЭМ выключены, пьезокерамический преобразователь ПП находится в исходном состоянии, концевой выключатель КВ разомкнут.

При нажатии на кнопку «Пуск» устройство управления УУ включает электромагнит ЭМ и с заданной временной задержкой разрешает работу усилителя мощности УМ. За это время происходит прижатие свариваемой полимерной магистрали пьезокерамическим преобразователем ПП к элементу Л, после чего электрический сигнал с выхода усилителя УМ поступает через датчик тока ДТ на пьезокерамический преобразователь ПП. Он преобразует электрическую энергию в механические колебания, которые подводятся к свариваемой магистрали. Начинается процесс ультразвуковой сварки.

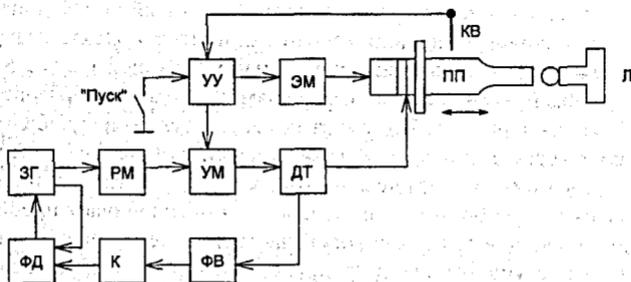


Рисунок 4 - Структурная схема заваривателя магистралей контейнеров переливания крови

Сигнал с датчика тока ДТ через фазовращающую цепь ФВ и компаратор К поступает на фазовый детектор ФД, который отслеживает изменение разности фаз напряжения с выхода задающего генератора и тока через пьезокерамический преобразователь ПП. Сравнивая это значение с заданным, фазовый детектор ФД вырабатывает сигнал управления для изменения частоты задающего генератора ЗГ. Таким образом реализуется система фазовой автоподстройки частоты.

В процессе сварки пьезокерамический преобразователь ПП перемещается к ложементу до концевого выключателя КВ. При срабатывании концевого выключателя КВ устройство управления УУ запрещает работу усилителя мощности УМ, прекращая процесс сварки. Управляющее устройство УУ при этом с установленной временной задержкой отключает электромагнит ЭМ. Пьезокерамический преобразователь ПП возвращается в исходное положение.

Разработанная конструкция заваривателя по сравнению с предыдущей конструкцией обладает более высокими долговечностью, надёжностью, технологичностью, более проста в обслуживании. Переход на частоту колебаний 40 кГц позволил существенно уменьшить его габариты.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Патент на пол. модель 7440 У РБ МПК (2006.01) А 61J 1/05, В 65В 51/22; ГНУ «ИТА НАН Беларуси», ЧТПУ «Контех-05». - № и 20101028; заявл.2010.12.09; опубл. 2011.08.30 // Афіцыйны бюл. /Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.- 2011.- №4.- С.167.

УДК 621.9

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ

*Саливончик Ю.Н., Сокол В.А.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Обработка резанием является наиболее распространённым способом формообразования в промышленности. В силу этого сами процессы, а также динамические явления, имеющие место в технологических системах, являются объектом постоянного изучения и оптимизации. Это обуславливает необходимость развития и внедрения средств автоматизации различных этапов производствен-

ного процесса, в том числе контроля и мониторинга технического состояния режущих инструментов и элементов станочных систем.

Известно, что при производстве технология должна обеспечить точность, минимальную себестоимость и производительность. Для оптимизации всех трех вышеперечисленных параметров важно своевременно диагностировать состояние режущего инструмента. Своевременное установление степени изношенности режущего инструмента позволяет в нужный момент вывести его из работы и не допустить поломки, что приводит к экономии инструментального материала при переточке и увеличению срока службы режущего инструмента. Это особенно важно в современных условиях, когда даже минимальная экономия, например времени обработки, при массовом производстве может привести к значительному снижению себестоимости, что даст преимущество на рынке. Кроме того, износ режущего инструмента в процессе работы приводит к изменению его геометрических размеров и, как следствие, является одной из главных причин снижения точности обработки на металлорежущих станках.

Остановка процесса обработки по причине износа инструмента часто означает брак дорогостоящей детали. Контроль состояния и замена инструмента в реальных производственных условиях осуществляется на основе расчётной стойкости. Но в зависимости от качества инструмента стойкость инструмента в одной партии колеблется в довольно широких пределах. Поэтому если определять время работы по наихудшему образцу инструмента из партии, то более стойкие образцы будут не до конца использовать свой ресурс, что приведёт к увеличению количества используемого инструмента и, как следствие, повышению себестоимости изготовления продукции.

Без информации об интенсивности изнашивания инструмента невозможна оптимизация процессов резания, а также процедура выбора оптимальных технологических условий обработки и т. д. Поэтому актуальным является создание системы, которая сможет осуществлять мониторинг за состоянием режущего инструмента и позволит вывести его из работы при достижении крайних значений измеряемых параметров.

В настоящее время в связи с ростом промышленного производства всё большее влияние уделяется дальнейшему совершенствованию технологических процессов изготовления деталей. Для этого необходимо детально изучать процессы, протекающие при механической обработке. Особенно важным является изучение закономерностей процесса резания, так как они влияют на длительность работы режущего инструмента, что сказывается на качестве, производительности и себестоимости механической обработки.

В процессе резания в элементах технологической системы могут возникать колебания, называемые вибрациями. Вибрация – это механические колебания тела. Раскрытие физических причин возмущения колебаний при резании металлов является важной задачей. Практика показала, что при различных условиях обработки могут появляться колебания детали, оборудования и инструмента разной частоты.

Наиболее эффективным направлением в контроле режущих инструментов является их мониторинг (непрерывный контроль). Все методы контроля текущей работоспособности режущего инструмента можно условно разделить на четыре группы:

1) устройства, в которых объектом контроля является режущий инструмент (ширина площадки износа, температура, расстояние от вершины или режущей кромки до постоянной базы);

2) объектом контроля является обрабатываемая деталь (размеры, шероховатость обработанной поверхности, температура на поверхности);

3) объектом контроля является стружка (форма, направление схода, температура);

4) объектом контроля является процесс резания (длительность цикла обработки, мощность резания, силы резания, вибрации, акустическая эмиссия, ЭДС в зоне резания).

В свою очередь методы, представленные в этих группах, можно поделить на методы прямого контроля, основанные на регистрации износа инструмента, и косвенного контроля, использующие физические явления, сопровождающие процессы резания и изнашивания инструмента.

Обеспечение надежности и эффективности процесса механообработки является невозможным без информации о текущем состоянии режущего инструмента и прежде всего, количественной оценки интенсивности изнашивания режущего инструмента. Недоступность зоны резания для прямого наблюдения вынуждает строить модели и судить о контактных процессах по косвенным параметрам.

Следующим шагом в развитии систем оперативной диагностики состояния режущего инструмента является прогноз, точность и достоверность которого основывается на точности выбранного метода промышленного мониторинга. Поведение объекта диагностики зависит от большого числа неодинаковых по значимости факторов, поэтому полученные модели хорошо работают только на той группе материалов и в тех условиях, в которых проводились исследования.

Исходной предпосылкой оценки состояния режущего инструмента по параметрам вибрации является то, что вибросигнал работающей технологической системы, содержит большое количество информации о её состоянии. На выходе датчика преобразованные механические колебания имеют вид аналогового временного сигнала. Но, вследствие сложности формы временного сигнала, его интерпретация сильно затруднена, поэтому наряду с этим принято анализировать спектр сигнала, который является представлением временного сигнала в частотной области.

Используя последние разработки в развитии методов мониторинга, средств измерения и повышение быстродействия вычислительных средств, в работе сотрудников Брестского государственного технического университета предложен принципиально новый подход к прогнозу параметров процесса резания, основанный на принципе самоорганизации моделей. Согласно этому принципу, для оперативных измерений осуществляется целенаправленный перебор многих моделей-претендентов различной сложности по ряду критериев, в результате которого находится модель оптимальной структуры в виде одного уравнения

или системы уравнений, которые используются при построении прогнозов, с учетом коррекции по экспериментальным данным. Одна из главных причин снижения точности обработки на металлорежущих станках – изменение размеров режущего инструмента вследствие его износа - критерия отказа, характеризующегося максимально допустимым износом режущего лезвия, после достижения которого наступает его отказ.

Для углубления знаний о явлениях, возникающих при резании, проведены экспериментальные исследования, в ходе которых выявлены некоторые закономерности влияния величины износа режущего инструмента на выбранный параметр.

Для выполнения задач, поставленных в рамках одного из этапов научно-исследовательской работы кафедры «Технологии машиностроения», были проведены экспериментальные исследования, в процессе которых деталь, в качестве которой использовался прутки Ø 40 мм из стали 35, обрабатывалась токарным проходным упорным резцом 2103-0058 ГОСТ 18879-73, оснащённым пластиной из твёрдого сплава Т15К6. Геометрические параметры резца:  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\alpha = 6^\circ$ ;  $\varphi = -93^\circ$ .

Обработка производилась на токарно-винторезном станке «СН-501», кинематическая схема которого позволяет реализовать необходимый диапазон изменения режимов резания при исследованиях.

Для получения вибрационного сигнала в качестве первичного преобразователя использован акселерометр со встроенной электроникой АР-98, который устанавливался на резцедержателе.

Измерение параметров вибрационного сигнала, обработка и управление процессами осуществлялось с использованием аппаратно-программного комплекса ВИКМА-2. При проведении эксперимента была накоплена база данных, фиксирующихся ЭВМ, в виде группы файлов, которые затем обрабатываются и анализируются. Вышеописанные данные возможно произвести в виде графиков, спектров и трехмерном представлении Габора с помощью программы «VibroAnalyzer 1.0.7».

В ходе эксперимента были получены вибросигналы после различной величины пути резания. При первичном рассмотрении можно отметить, что с увеличением времени работы инструмента происходит изменение величины вибросигнала (на отрезке времени первичного и нормального износа). Немаловажно отметить, что при параллельном исследовании акустического сигнала результаты эксперимента получались схожими.

Актуальность решаемой задачи повышается при обработке труднообрабатываемых материалов, поскольку для этих материалов трудоемкость обработки заготовки соизмерима с ресурсом инструмента, а также связана с отсутствием экспериментальных данных.

Необходимо отметить, что без информации об интенсивности изнашивания инструмента невозможна оптимизация процессов резания. Для этих целей выделен ряд критериев износа – сумма признаков (или один решающий признак), при которых работа инструментом должна быть прекращена.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ВАЛОВ ГИДРОМАШИН

Голуб В.М.

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

В системе трубопроводного транспорта одним из ответственных звеньев технологической цепи является насос. От его работоспособности зависит технологический процесс по перекачке жидких сред. Так, на магистральных нефтепроводах насосные агрегаты имеют единичную подачу до 12,5 тыс. м<sup>3</sup>/ч при давлении перекачки 6,5 Мпа. Современные перекачивающие станции – сложные энергетические сооружения с установленной мощностью до 32 тыс. кВт. В связи с этим предъявляются жесткие требования к герметичности валов насосов, их пожаро- и взрывобезопасности.

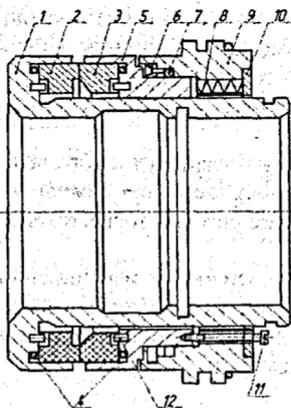
В гидравлических системах используются различные уплотняющие элементы, от работоспособности которых зависит надежность всей системы в целом.

Современный период эксплуатации нефтяных центробежных насосов магистральных нефтепроводов характеризуется значительным повышением срока службы уплотнений. Однако доля отказов насосного оборудования, по причине выхода из строя уплотнений валов, остается преобладающей в общем числе отказов. Если учесть, что при каждом отказе уплотнений насосный агрегат автоматически отключается, то актуальность проблемы повышения надежности и долговечности уплотнений становится очевидной.

На сегодняшний день в центробежных насосах герметизация выхода вала из корпуса осуществляется уплотнениями торцового типа (рисунок 1), как наиболее эффективными. Основными герметизирующими элементами таких уплотнений являются кольца контактные торцевой пары трения.

Принцип герметизации в таком уплотнении основан на создании гидравлического сопротивления в торцовом щелевом зазоре контактного пояса пары трения, практически исключающего протечки жидкости. Гидравлическое сопротивление создается весьма малым щелевым зазором, который достигается прецизионной обработкой контактных поверхностей колец ( $Ra = 0,08 - 0,16$  мкм и отклонением от плоскостности  $0,6 - 0,9$  мкм).

Предъявляемые к уплотнениям вала гидромашин требования все время повышаются.



- 1 – гильза вала; 2, 3 – кольца контактные;
- 4, 7 – уплотнительные резиновые кольца;
- 5 – аксиально-подвижная втулка; 6 – манжета;
- 8 – пружины; 9 – корпус уплотнения; 10 – пластина
- упорная; 11 – стопорный виигт; 12 – штифты стопорные

Рисунок 1 – Моноблочный вариант торцового уплотнения с резервным узлом защиты

Необходимо обеспечить надежную и длительную работу уплотнений при больших величинах давления уплотняемой среды (до 10,0 МПа и более), иногда с плохой смазочной способностью, и даже при наличии в ней механических примесей, а также высоких скоростях вращения вала, иногда при наличии вибрации.

Герметичность уплотнения оценивается величиной утечки уплотняемой среды через щель контактных колец пары трения. Поэтому важным является характер течения жидкости в узких микронных щелях.

Выбор конструктивных параметров торцовых уплотнений валов гидромашин, работающих с высоким давлением уплотняемой среды, определяется из условия минимального износа колец пары трения и практически нулевой утечки. Последнее может иметь место при оптимальном режиме трения контактирующих поверхностей колец, разделенных тонкой пленкой жидкости.

Величина утечки зависит от толщины разделительной пленки и перепада давления на контактной щели [1]. Для сравнительно большого размера щели утечка определяется по уравнению ламинарного течения:

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot D \cdot h^3 \cdot \Delta p}{3 \cdot \eta \cdot L} \quad (1)$$

где  $D$  – средний диаметр контактного кольца;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $L$  – ширина пояска (длина щели);  $h$  – половина высоты щелевого зазора (рисунок 2);  $\Delta p = (p_0 - p)$  – перепад давления на контактном пояске. Утечка прямо пропорционально зависит от перепада давления  $\Delta p$ .

Для снижения утечки следует добиваться предельного уменьшения толщины пленки за счет приложения нагрузки на контактные кольца. Шероховатость и отклонение от плоскости рабочих поверхностей должны составлять на порядок меньше толщины разделительной пленки.



Рисунок 2 – Распределение скоростей и касательных напряжений по сечению потока в щели

Режим трения при таких условиях оценивается как граничный. Характерным для него является то, что смазочное действие жидкости и ее течение становятся зависимым не только от вязкости, но и от ее физико-химических свойств и поверхностно-активного взаимодействия молекул с твердым телом, ее способности адсорбироваться на трущихся поверхностях, образуя граничную пленку [2].

При неблагоприятных условиях, с повышением нагрузки и температуры на контакте, возможно разрушение разделительной пленки с переходом к сухому режиму трения, тогда важную роль начинает играть материал колец пар трения и их способность работать без разрушения некоторое время при дефиците смазки.

В случае, когда контактирующие поверхности разделены жидкостной пленкой, решение задачи об утечке сводится к определению ее величины при ламинарном течении. Однако количественное описание протечки вязкой жидкости через узкие щели представляет определенные трудности. Анализ показывает, что модели, основанные на использовании ньютоновской жидкости и дающие для плоской щели кубическую зависимость расхода  $Q$  от величины зазора щели  $h$ , т.е.  $Q \sim h^3$ , не вполне соответствуют эксперименту. Уточнения, достигаются при использовании моделей неньютоновских жидкостей (рисунок 2) [3].

В связи с этим в модели первого приближения пренебрегаем необходимостью учета зависимости сопротивления от скорости в виде  $\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy}$  и вводим в рассмотрение нелинейную вязкость среды по формуле (изотермический случай):

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(\alpha \cdot p + f(y)), \quad -h < y < h \quad (2)$$

где  $\eta_0$  – вязкость течения макроскопического потока жидкости при нормальных условиях;  $\exp(\alpha p)$  – отражает учет зависимости вязкости от уровня давления в среде;  $\exp f(y)$  – учет зависимости вязкости от поперечной координаты частицы внутри щели (рисунок 2) [4].

Значения функции  $f(y)$  при  $y = \pm h$  должны определять вязкость течения граничных слоев жидкости, которая намного превосходит вязкость течения средних слоев потока. При возрастании зазора щели  $h$  (большие зазоры), относительная роль пристеночных слоев падает [1].

Для функции  $f(y)$  примем выражение вида:

$$f(y) = \gamma \cdot \left( \exp\left(-\beta \cdot h^m \cdot \left(\frac{h-y}{h}\right)^m\right) + \exp\left(-\beta \cdot h^m \cdot \left(\frac{h+y}{h}\right)^m\right) \right), \quad (3)$$

где  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $m$  – некоторые постоянные, подлежащие определению по данным эксперимента. Выражение (3) учитывает возможное взаимовлияние полей каждой из стенок щели. При больших зазорах влияние функции  $f(y)$  в средней зоне щели становится малозначимым.

Из (3) получаем:

$$f(0) = \gamma \cdot 2 \cdot \exp(-\beta \cdot h^m), \quad f(\pm h) = \gamma \cdot (1 + \exp(-\beta \cdot h^m \cdot 2^m)).$$

Для удобства введем в рассмотрение безразмерную поперечную координату  $\xi$  по формуле  $y = \xi h$ . В этом случае коэффициенты  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $m$  приобретают роль некоторых структурных параметров, отражающих свойства как протекающей в канале жидкости, так и адгезионные свойства пары "стенка – жидкость". В частности, влияние шероховатости поверхности, величина выступов (неровностей) которой сравнима с размером зазора щели, также интегрально учитывается этими параметрами.

Течение в щели считаем плоским, ламинарным. Учитывая также условие неразрывности течения и условие несжимаемости жидкости, приходим к уравнению движения частиц жидкости в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0,$$

где  $p(x)$  – давление в точках с координатой  $x$ ;  $\tau(x, y)$  – касательное напряжение в точке с координатами  $x, y$ ;  $V(y)$  – скорость струйки жидкости с поперечной координатой  $y$ .

Используя далее зависимости (2) – (3), приходим к двум уравнениям относительно  $p(x)$  и  $V(y)$ :

$$\frac{1}{\eta_0 \cdot \exp(\alpha \cdot p)} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = A \quad \exp(f(y)) \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right) = A,$$

где  $A = const$  – некоторая постоянная.

Решение для  $p(x)$  имеет вид:

$$p = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln(1 + A \cdot \alpha \cdot \eta_0 \cdot (L - x)),$$

где  $L$  – длина щели (по координате  $x$ ). Из условия  $p(0) = p_0$ , где  $p_0$  – давление на входе в щель, находим значение  $A$ :

$$A = \frac{1 - \exp(-\alpha \cdot p_0)}{\eta_0 \cdot \alpha \cdot L} \approx -\frac{p_0}{\eta_0 \cdot L},$$

откуда видно, что влияние параметра  $\alpha$  на распределение давления вдоль щели относительно невелико, поэтому во многих работах перепад давления по щели принимается линейным.

Для  $V(y)$  имеем уравнение, решение которого с учетом граничных условий:

$\frac{\partial v}{\partial y}(0) = 0, V(h) = 0$  принимает вид:

$$V(\xi) = V_0 \left( 1 - \frac{\Phi(\xi)}{\Phi(1)} \right), \quad (4)$$

где  $\Phi(\xi) = \int_0^\xi \xi \cdot \exp(-f(\xi)) \cdot d\xi$ ;  $V_0$  – скорость течения жидкости на оси щели (в точках с координатой  $\xi = 0$ ), которую можно определить через секундный массовый расход  $Q$  жидкости через щель.

Тогда получим:

$$V(\xi) = \frac{Q \cdot (\Phi(1) - \Phi(\xi))}{2 \cdot \rho \cdot b \cdot h \cdot (\Phi(1) - \int_0^1 \Phi(\xi) \cdot d\xi)}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $b$  – ширина щели (в направлении, ортогональном осям  $x, y$ ).

В связи со сложностью выражения (3), аналитическое решение (4) – (5) не выражается в элементарных функциях и при  $m \neq 0$  или  $m \neq 1$  построить его можно только численно. При  $\alpha = m = 0$ , что соответствует постоянному значению вязкости среды в щели, получаются известные решения для ньютоновской жидкости, приводящие к кубической зависимости расхода через щель  $Q$  от величины зазора  $h$  [1].

В общем случае секундный массовый расход можно найти из выражения:

$$Q = \int_h dt = \frac{2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot d \cdot h^2 \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot p_0))}{\eta_0 \cdot \alpha \cdot L} \cdot \left( \Phi(1) - \int_0^1 \Phi(\xi) \cdot d(\xi) \right). \quad (6)$$

Подбор значений параметров  $\eta_0, \gamma, \beta, m$  проведен с использованием имевшихся данных по утечкам через уплотнения жидкостей – бензина, воды, дизельного топлива и нефти. Ориентировочное значение  $\eta_0$  принималось по данным справочной литературы. Значения параметра  $\alpha = 0,03$  МПа<sup>-1</sup> приняты одинаковыми для всех рассмотренных жидкостей, хотя при необходимости его можно варьировать в зависимости от вида жидкости и ее температуры, причем эти данные можно взять из справочной литературы или независимых опытов, не связанных напрямую с прокачкой жидкости через узкие щели. Более точно величину параметра  $\alpha$  можно было бы определить при наличии экспериментальной зависимости распределения давления по потоку  $p = p(x)$ .

На рисунке 3 показан характер падения давления и касательных напряжений на стенках щели вдоль ее продольной оси. Построенная по найденным для нефти числовым данным зависимость расхода от величины зазора  $Q(h^3)$  в более широком диапазоне изменения  $h$  показана на рисунке 4 кривой 1. Там же кривой 2 показана соответствующая зависимость для ньютоновской среды.

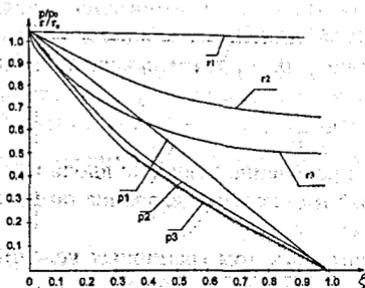


Рисунок 3 – Распределение давления и касательных напряжений вдоль щели

- 1)  $p_0=1,0$  МПа; 2)  $p_0=20,0$  МПа;  
3)  $p_0=30,0$  МПа)

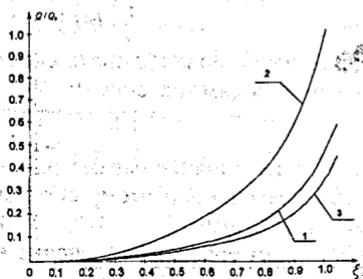


Рисунок 4 – Зависимость расхода от высоты щели

Отметим, что рассматриваемая модель легко может быть приспособлена и к течению жидкости в кольцевых зазорах, образованных двумя цилиндрическими поверхностями.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник. / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.В. Гордеев [и др.] / под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. -2-е изд., перераб. и доп. -М.: Машиностроение, 1994. -448 с.
2. Справочник по триботехнике: в 3-х томах / год общ. ред. М. Хебды и А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение. 1989. – Т1, Т2.
3. Гидравлика, гидромашин и гидропривод. / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов [и др.]. – 2-е изд. перераб. -М.: Машиностроение, 1982. -423 с.
4. Голуб, В.М. Гидравлическая плотность контактной пары трения торцового уплотнения / В.М. Голуб, Ю.М. Плескачевский // Трение и износ. –2001. – Т. 22, №3. – С. 271-277.

**ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ.  
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ**

## МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ФОРМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА

*В. Тарасюк<sup>1</sup>, Б. Крунич<sup>1</sup>, В.В. Барсуков<sup>2</sup>*

1) Белостокский политехнический университет,

Белосток, Польша;

2) Гродненский дом науки и техники,

Гродно, Беларусь

Процесс изготовления силикатных кирпичей осуществляется в формах, состоящих из корпуса и сменных формообразующих плит (рис. 1), которые циклично взаимодействуют с формуемым материалом [1,2]. Опыт эксплуатации показывает, что сменные плиты подвергаются более интенсивному изнашиванию, чем другие элементы технологической оснастки [3, 4]. Износ плит, который проявляется в неравномерной потере их толщины (рис. 2), вызывает простои производственной линии, обусловленные необходимостью замены формообразующей оснастки, а это увеличивает производственные расходы.

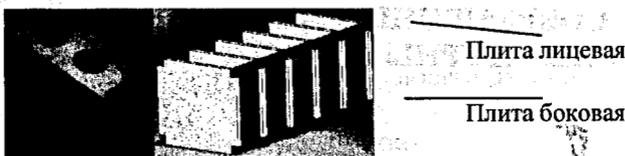


Рисунок 1 – Силикатный кирпич 3NFD, а также плиты формы для его изготовления

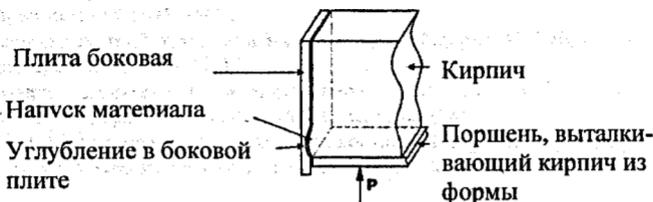
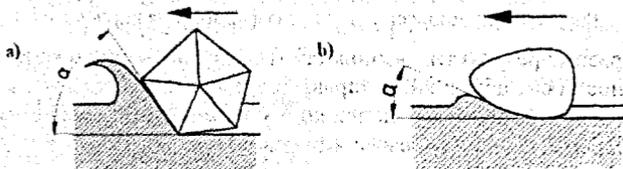


Рисунок 2 – Схема образования дефектов изделия (напуск материала) вследствие абразивного износа плиты

Уменьшение последних возможно за счет двухстороннего использования плит, а также подбора материала, стойкого к абразивному изнашиванию. Процесс изнашивания плит изучался на комплекте формообразующей оснастки, применяемой при изготовлении силикатного кирпича марки 3NFD. Анализ механизма изнашивания позволит: установить следующее. Во время прессования известково-песчаной смеси происходит перемещение её компонентов, неодинаковое в различных местах формы. Причем зоне большего уплотнения смеси соответствует зона большего рабочего давления на боковые стенки плит, которое в условиях движения вызывает появление силы трения, связанной с силой нормального давления.

Следует предположить, что перемещающиеся по плите формы зерна песка в условиях трения при больших давлениях будут оставлять следы в виде пластически деформированных дорожек вдоль траекторий движения этих зерен. Для определения типа повреждений поверхности плиты исследовали методами оптической и сканирующей микроскопии. При этом наблюдались характерные черточки, которые указывали на абразивный характер повреждений.

Установлено, что доминирующими являются два механизма – микрорезание и процесс образования борозд пластическим оттеснением (пропахиванием) материала. Их схема представлена на рисунке 3.



а) острые углы зерна и большой угол  $\alpha$  – микрорезание,  
 б) овальная форма зерна и малый угол  $\alpha$  – процесс пропахивания борозд  
 Рисунок 3 – Схема протекания абразивного изнашивания

Микрорезание вызывают зерна, имеющие острые углы и большой угол «схода» стружки  $\alpha$ , а также зерна формы, близкой к шарообразной, но характеризующиеся большим углом  $\alpha$ . Зерна овальной формы и с малым углом  $\alpha$  вызывают процесс пропахивания борозд путем пластического деформирования верхнего слоя. Причем оба типа зерен используются в уплотняемом материале (рис.4).

Процесс пластического пропахивания борозд сопровождается растяжением верхнего слоя в задней части пятна контакта зерна уплотняемой смеси с плитой.



Рисунок 4 – Форма зерен известково-песчаной смеси

Движение последующих частиц по одному и тому же пути при больших давлениях вызывает исчерпание ресурса пластичности материала. При этом в случае локального превышения предела

прочности материала на растяжение происходит появление трещин в верхнем слое, направленных поперек траектории движения зерен, а также отрыв частиц материала плиты. Если в процессе прессования используются достаточно большие давления зерен на плиты, то может происходить отрыв частиц материала плит. Можно наблюдать следы микрорезания и пропахивания борозд, а также места, где произошел отрыв частиц плит. На рис.5 представлены соответствующие изображения поверхностей износа, полученные на машине MISTRAL и обработанные при помощи программы Sigma Plot. Отчетливо видны места, в которых наблюдаются наибольшие потери материала.



Рисунок 5 – Карта износа плит для формования кирпича 3NFD

Таким образом, результаты выполненных исследований позволили установить, что износ носит абразивный характер, причем наибольшая интенсивность имеет место в примыкающей к подвижному поршню зоне, для которой характерны наибольшие значения осевого и бокового давления.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Skalamowski W., Technologia materiałów budowlanych. – Warszawa: Arkady, 1973. – Т. II.
2. Wolfke S. Technologia wyrobów wapienno-piaskowych. – Warszawa: Arkady, 1986.
3. Fukahori. Y. Criteria for crack initiation during rubber abrasion / Y. Fukahori, H. Liang, J.J.C Busfield. – *Wear*, 2008. – Vol. 265, P. 387–395.
4. Tarasiuk, W. Analiza zużycia płyt formy cegły wapienno piaskowej / W. Tarasiuk, B. Kruicz. – *Tribologia*. – 4/2008/4 (220). – P. 155–163.

УДК 621.791.72

### ВЗАИМОСВЯЗЬ СКОРОСТИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В КОМПОЗИЦИОННОМ ПОЛОСЧАТОМ ПОКРЫТИИ ИЗ СПЛАВА ПГ-12Н-01 И БРОНЗЫ ПГ-19М-01

*Девоино О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

В последние годы в связи с резким увеличением потребности промышленности в высокоизносостойких материалах все больше возрастает роль композиционных материалов. В этом смысле большой интерес может представлять лазерная наплавка как инструмент создания композиционных полосчатых покрытий из разнородных металлических материалов. Такие покрытия характеризуются не только высокой износостойкостью, но и анизотропией износостойкости и физико-механических свойств в разных направлениях относительно наплавляемых валиков [1,2].

В данной работе изучалось распределение элементов в композиционном полосчатом покрытии, полученном методом лазерной наплавки чередованием валиков из самофлюсующегося сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01. Химический состав исходных порошков приведен в таблице 1.

Таблица 1- Химический состав наплавлявшихся порошков

Марка	Содержание компонентов, % (по массе)									
	Cr	B	Si	Fe	C	Ni	Co	Cu	W	Al
ПГ-12Н-01	8-14	1,7-2,5	1,2-3,2	1,2-3,2	0,3-0,6	Осн	-	-	-	-
ПГ-19М-01	-	-	-	До 4	-	-	-	Осн	-	8,5-10,5

Покрyтия наносились на технологическом комплексе на базе CO<sub>2</sub>-лазера непрерывного действия типа «Комета» и системы числового программного управления на образцы из стали 45, предварительно подвергнутые дробеструйной обработке. Наплавка композиционного полосчатого покрытия велась в четыре этапа. Поперечное сечение полученного композиционного покрытия приведено на рисунке 1. После наплавки образцы разрезались в направлении, перпендикулярном валикам наплавки, и заливались в оправки, после чего шлифовались и полировались. На полученных образцах проводилось исследование содержания элементов в валиках самофлюсующегося сплава и бронзы в композиционном покрытии.



Рисунок 1- Поперечное сечение двухслойного композиционного полосчатого покрытия из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 х50

Данные исследования осуществлялись на аттестованном сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Miga» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором «INCA Energy 350» фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Погрешность метода составляла 3-5 относительных процентов. Определялось содержание элементов в валиках самофлюсующегося сплава и бронзы в композиционном полосчатом покрытии в зависимости от скорости наплавки сплава/бронзы. Полученные данные представлены на рисунках 2 и 3.

Проведенные исследования показали, что из-за интенсивного перемешивания материалов композиционного покрытия в ванне расплава происходит достаточно большая диффузия элементов фаз композиционного покрытия друг в друга. При этом области самофлюсующегося сплава и бронзы в композиционном покрытии по своему составу сильно отличаются от состава исходных материалов (таблица 1). Так, медь из бронзы интенсивно проникает в самофлюсующийся сплав, в то же время никель и хром из самофлюсующегося сплава интенсивно диффундируют в бронзу.

Содержание меди в фазе самофлюсующегося сплава в композиционном покрытии доходит до 10%, в то время как в порошке сплава ПГ-12Н-01 она отсутствует. Содержание никеля в этой фазе композиционного покрытия составляет 60-78%; хотя в порошке этого сплава содержание никеля составляет 80%, содержание хрома также меньше значений приведенных в таблице 1.



Рисунок 2 - Зависимость содержания элементов в бронзовой составляющей двухслойного композиционного покрытия от скорости наплавки

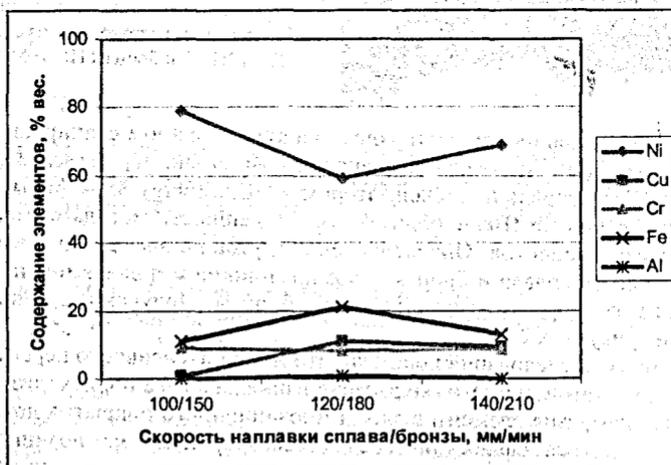


Рисунок 3 - Зависимость содержания элементов в самофлюсующемся сплаве двухслойного композиционного покрытия от скорости наплавки

В фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия за счет диффузии из основы наблюдается большое содержание железа – 12-21%, против 1,2-3,2% в порошке сплава ПГ-12Н-01. Алюминий из фазы бронзы практически не проникает в фазу самофлюсующегося сплава. В фазе бронзы композиционного покрытия содержание меди составляет всего 18-33%, тогда как в порошке

бронзы меди 90%. В то же время содержание никеля в фазе бронзы доходит до 42-60%, содержание хрома – до 8%, а содержание железа – до 8-15%, хотя в порошке бронзы эти элементы отсутствуют. Содержание алюминия в фазе бронзы соответствует данным таблицы 1.

Сравнивая распределение элементов при разных скоростях лазерной наплавки, можно заметить некоторое влияние скорости наплавки на содержание элементов как в бронзовой составляющей (рисунок 2), так и в фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия (рисунок 3).

Из рисунка 2 видно, что при увеличении скорости наплавки сплава/бронзы со 100/150 мм/мин. до 120/180 мм/мин. в бронзовой составляющей композиционного покрытия количество никеля уменьшается, но в то же время возрастает количество меди и железа. При дальнейшем увеличении скорости наплавки до 140/210 мм/мин. количество никеля в бронзовой составляющей вновь увеличивается, а количество меди и железа – уменьшается. Содержание хрома и алюминия в бронзовой составляющей практически не зависит от скорости наплавки.

На рисунке 3 можно заметить, что при увеличении скорости наплавки сплава/бронзы со 100/150 мм/мин. до 120/180 мм/мин. в фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия количество никеля уменьшается, а количество меди и железа увеличивается как и в фазе бронзы. С увеличением скорости наплавки до 140/210 мм/мин. содержание никеля в фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия возрастает, содержание же железа и меди уменьшается аналогичным образом. Содержание хрома и алюминия в фазе самофлюсующегося сплава композиционного покрытия, как и в предыдущем случае, от скорости наплавки не зависит.

Такой характер зависимостей связан скорее всего со сложными процессами нагрева – охлаждения происходящими с изменением скорости наплавки при нанесении многослойных композиционных покрытий, в том числе при повторных нагревах-охлаждениях при наплавке соседних валиков и слоев. Действующими факторами в данном случае могут являться величина энерговклада в покрытие, величина экранирования излучения лазера аэрозолями наплавляемых металлов, а также соотношение теплоемкостей компонентов многослойного композиционного покрытия.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Девойно, О.Г. Формирование однослойных композиционных полосчатых покрытий из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, получаемых лазерной наплавкой / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, Н.И. Луцко, О.Н. Кавальчук. – Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов: в 3 кн. / редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. – Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки – 616 с.: ил., С. 177-184.
2. Девойно, О.Г. – Формирование двухслойных композиционных покрытий из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, полученных лазерной наплавкой / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, Н.И. Луцко, А.С. Лапковский, О.Н. Кавальчук. – Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.Л. Кирпичева и 45-летию ПГУ, Новополоцк, 29-30 окт. 2013 г./ Полоц. гос. ун-т: под общ. ред. А.И. Гордисенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2013. – С. 126-130.

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПЛАКИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Шелег В.К.<sup>1</sup>, Белоцерковский М.А.<sup>2</sup>, Копылова Е.Ф.<sup>1</sup>, Леванцевич М.А.<sup>2</sup>

1) Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь,

2) Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь

**Введение.** Из большого количества способов формирования защитных пленок и покрытий в последние годы все большее внимание специалистов привлекает достаточно простой в реализации, мало энергоемкий и экономичный метод формирования покрытий деформационным плакированием с помощью гибкого инструмента – вращающейся щетки с проволочным ворсом [1]. Вращающаяся щетка взаимодействует одновременно с поверхностью обрабатываемой детали и стержнем, выполненным из материала-донора. При реализации процесса материал-донор прижимается к быстровращающейся проволочной щетке, далее к щетке подводится плакируемая деталь, и между ними создается натяг за счет вдавливания ворса на глубину, зависящую от конструктивных параметров щетки и режимов обработки. Ударно-скользящее воздействие ворса на деталь приводит к совместной пластической деформации материалов основы и донора, что способствует их прочному соединению.

Учитывая простоту и эффективность метода деформационного плакирования, было предложено его использовать в качестве способа предварительной обработки деталей и нанесения промежуточных адгезионных слоев, а также для обработки нанесенных покрытий с целью закрытия поверхностных пор. Таким образом, целью выполненных исследований явилась оценка возможности применения деформационного плакирования в процессах газотермического напыления металлических покрытий.

**Методика проведения исследований.** Для газотермического нанесения металлических покрытий использовали следующие установки: активированного газопламенного напыления проволоки (установка ТЕРКО), электродуговой металлизации (установка ЭМ-14), гиперзвуковой металлизации (установка АДМ-10). Процесс деформационного плакирования осуществляли на экспериментальной установке конструкции ОИМ НАН Беларуси, оснащенной стальными щетками диаметром 180...200 мм, шириной – 20 мм, с толщиной и вылетом ворса – соответственно 0,25 и 30 мм. Покрытия наносили на поверхность образцов из стальных пластин 50x50x3 мм, а также на торец конусных штифтов, используемых в приспособлении для оценки прочности сцепления «на отрыв» нормально приложенной нагрузкой. Материал покрытий – проволочные стали 95Х18 и 30Х20НМ.

На первом этапе исследований деформационное плакирование использовали для подготовки поверхности напыляемой детали и нанесения промежуточного слоя. На втором этапе изучалась возможность использования деформационного плакирования для уплотнения поверхностного слоя газотермического покрытия и повышения его антикоррозионных свойств.

### Результаты экспериментов и их обсуждение.

Стальной щеткой осуществляли предварительную подготовку поверхности, а затем срезание и перенос частиц материала с элемента-донора на поверхность детали. В качестве материала промежуточного слоя (материала - донора) был выбран самофлюсующийся сплав на основе меди марки ПР-ОНСР. Этот выбор был обусловлен низкой температурой плавления сплава (около 700°C) и его высокой пластичностью. Ожидалось, что расплавленные частицы стальной проволоки, попадая на тонкий слой самофлюсующегося сплава, будут подплавлять его и образовывать очаги микросварки, что способствует повышению прочности сцепления формируемого стального покрытия с основой.

Процесс деформационного плакирования осуществлялся на следующих режимах: число оборотов детали - 170 об/мин; скорость скольжения ворса щетки относительно детали - 35...40 м/сек; частота вращения щетки 3000 об/мин; величина натяга (относительное сближение оси щетки с поверхностью детали) - 2 мм. После очистки поверхности, произведенной за 3 прохода щеткой, материал-донор, изготовленный в виде таблетки, прижимали к стальному ворсу с усилием 40 Н и выполняли 6 проходов по поверхности детали. Были нанесены слои толщиной 25 - 35 мкм. Прочность сцепления плакированных слоев с основным металлом составила более 40 МПа.

Основное покрытие наносили методом гиперзвуковой металлизации распылением проволоки из стали 95X18 [2]. Исследование адгезии сформированных покрытий показало, что почти у половины образцов (около 40%) происходило отслоение газотермического покрытия от промежуточного слоя при удельных нагрузках отрыва от 10 до 23 МПа. У 25% образцов зарегистрирована достаточно высокая прочность сцепления, превышающая 45 МПа. Анализ полученных результатов показывает необходимость дальнейших исследований в направлении выбора материала донора. Очевидно, что необходим такой сплав, который бы образовывал твердые растворы и химические соединения с материалом напыляемого покрытия.

В ходе изучения процесса деформационного плакирования газотермических покрытий были выявлены значительные отличия получаемых результатов от тех, которые были ранее получены при плакировании монолитных поверхностей. Установлено, что при использовании материала-донора, близкого по составу и механическим характеристикам материалу газотермического покрытия, наружный слой с необходимыми параметрами (равномерность и плотность - 100%, толщина более 10 мкм) сформировать не удастся. Так, не удалось получить однородный слой толщиной более 2 - 4 мкм нанесением нержавеющей стали на напыленную сталь, а также нанесением латуни на напыленную бронзу.

Установлено, что основное влияние на качество наносимого деформационным плакированием слоя на газотермическом покрытии оказывает количество и размер поверхностных пор. Было предположено, что предел прочности на растяжение у материала наружного слоя должен быть меньше предела прочности напыленного металлического слоя, причем, чем выше пористость и диаметр поровых каналов, тем больше должна быть разница между механическими свойствами донора и напыленного слоя. При этом скорость полета частиц, формирующих слой, также может оказывать существенное влияние на механические характеристики выбираемого донора, но это влияние не носит характер прямой пропорциональной зависимости.

Учитывая вышесказанное, в качестве материала для нанесения наружного слоя методом деформационного плакирования была выбрана сталь аустенитного класса X18H9T, имеющая предел прочности на растяжение  $\sigma_p = 720$  МПа. Покрытия наносили методом гиперзвуковой металлизации на установке АДМ-10 распылением проволоки из стали 30X20HM, предел прочности на растяжение которой выше, чем у материала-донора ( $\sigma_p = 990$  МПа). Средняя поверхностная пористость напыленных покрытий составила 0,04. Средний диаметр поверхностных пор составил 8 мкм. Процесс деформационного плакирования осуществлялся на следующих режимах: скорость скольжения ворса щетки относительно образцов – 35...40 м/сек; частота вращения щетки 3000 об/мин; величина натяга (относительное сближение оси щетки с поверхностью образца) – 2 мм. Материал-донор, изготовленный из стали X18H9T в виде таблетки, прижимали к стальному ворсу с усилием 40 Н и выполняли 6 проходов по поверхности газотермического покрытия. Были нанесены наружные слои толщиной 35 – 40 мкм. Качество формирования наружного слоя контролировали визуальным осмотром при двадцатикратном увеличении. На поверхности не наблюдалось видимых трещин, отслоений, раковин, пор, пропущенных участков. Далее на поверхность наружного слоя были нанесены маркеры износа в виде отпечатков пирамиды на твердом Викерсе.

Испытания, выполненные на специальном трибометре при возвратно-поступательном движении образцов по закаленной стали 9ХВГ в среде 15% раствора КОН, содержащего 12 – 15 об.% частиц оксида кремния размером  $\leq 50$  мкм, показали, что за 750 циклов на испытываемых поверхностях покрытий, прошедших деформационное плакирование, не образовалось никаких видимых дефектов. Интенсивность изнашивания, определенная замером диагональ отпечатков, составила, в среднем, 3 мкм/км. У образцов без обработки деформационным плакированием по окончании испытаний наблюдались локальные разрушения покрытий, а средняя интенсивность изнашивания составила более 10 мкм/км.

**Заключение.** Анализ результатов исследования показал, что при использовании метода деформационного плакирования для подготовки поверхности под напыление и нанесения промежуточного слоя необходимо в качестве донора выбирать материал, способный образовывать твердые растворы и химические соединения с материалом напыляемого покрытия.

Использование метода деформационного плакирования для финишной обработки напыленных покрытий позволяет повысить их износо- и коррозионную стойкость. При этом необходимо изготавливать донор из материала с пределом прочности на растяжение ниже, чем у напыляемого материала. Для получения численных зависимостей между прочностными показателями донора и покрытия требуется проведение дополнительных исследований.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Леванцевич, М.А. Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко, В.Г. Зольников // Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2005. - №1. – С. 67-72.
2. Белоцерковский, М.А. Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Инновации в машиностроении: сборник научн. трудов. (Минск, 30-31 октября 2008 г.) / Редкол.: М.С. Высоккий [и др.]. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2008. – С. 479 – 484.

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА В ЖИДКОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ РАЗМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

*Лежик С.Д., Зноско К.Ф., Шупан П.И., Волков И.А.*

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,  
Гродно, Республика Беларусь

**Введение.** В последние годы полимерные наночастицы привлекают все большее внимание в связи с развитием методов их получения, а также, что, может, не менее важно, методов их исследования [1-3]. В настоящее время полимерные ультрадисперсные материалы находят применение в микроэлектронике, катализе, триботехнике, микробиологии и других областях. Зачастую наночастицы вводятся в жидкие среды, поэтому эффективные методы получения наночастиц полимерных материалов непосредственно в жидкости могут представлять практический интерес. Среди полимерных материалов особое место занимает политетрафторэтилен, обладающий превосходными анти-фрикционными свойствами, высокой химической и термической стойкостью. Наночастицы этого материала могут выполнять роль противозносных наноприсадок в технических жидкостях, функциональных покрытиях, композиционных материалах. Одним из способов получения наночастиц твердофазных веществ в жидкости является лазерная абляция. Настоящая работа посвящена лазерной абляции политетрафторэтилена в жидкой среде и изучению образующихся при этом наноструктур.

**Материалы и техника эксперимента.** В качестве мишени при проведении импульсной лазерной абляции (ИЛА) использовали промышленный политетрафторэтилен (ПЭТФ) марки Ф-4 по ГОСТ 10007-80. Абляцию проводили излучением неодимового лазера LS-2147 с длиной волны 532 нм и 355 нм. Частота импульсов составляла от 1 до 10 Гц. Энергия в импульсе варьировалась от 15 до 120 мДж. Длительность импульсов составляла 30 нс (16 нс на полувысоте импульса). Лазерное излучение фокусировалось на мишень, находящуюся под слоем жидкости на различной глубине. В качестве жидкости, в которой осуществлялась абляция, применяли дистиллированную воду.

Исследования размерных характеристик частиц, генерированных лазерной абляцией твердых тел в жидкости, проводили с использованием атомно-силового микроскопа NT-206. Сканирование проводили на воздухе, при нормальных условиях и комнатной температуре с использованием кантилевера CSC 38/AIBS жесткостью 0,03 Н/м.

**Результаты и их обсуждение.** В отличие от наблюдаемого при абляции металлов в различных жидкостях значительного изменения цвета образующейся суспензии [4], при абляции политетрафторэтилена в воде наблюдалось лишь незначительное помутнение жидкости. Для проведения исследований частиц методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) пробы полученной суспензии наносили на подложку из кварцевого стекла с последующим высушиванием. На

рис. 1 представлены характерные изображения частиц, полученных в результате абляции политетрафторэтилена импульсным лазерным излучением с длиной волны 532 нм, на которых видны как скопления наноразмерных частиц (измерения по оси Z на АСМ-изображениях), так и отдельные крупные частицы субмикронного и микронного размерного уровня.

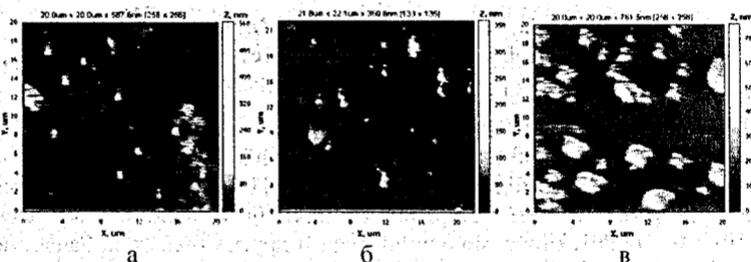


Рисунок 1 – АСМ-изображения частиц, полученных ИЛА политетрафторэтилена в дистиллированной воде при различных значениях энергии в импульсе: а – 30 мДж, б – 60 мДж, в – 120 мДж

Установлено, что размер частиц, образующихся при импульсной лазерной абляции политетрафторэтилена в дистиллированной воде, зависит от энергии в импульсе (рис. 2). При значениях энергии в импульсе 20-30 мДж пик распределения частиц по размерам приходится на 20-40 нм. С увеличением энергии в импульсе до 60 мДж наблюдается смещение максимума на гистограмме распределения частиц по размерам в область 40-60 нм, а при энергии в импульсе в 120 мДж большая часть продуктов абляции имеет размеры от 100 нм и более. Наблюдаемую зависимость можно объяснить тем, что с ростом энергии в импульсе увеличивается и ванна расплава на поверхности мишени. Чем больше ванна расплава, тем большее количество частиц материала покидает поверхность и тем больше вероятность их агрегации в результате столкновения их между собой [4]. Кроме того, с увеличением энергии лазерного воздействия возрастает и роль так называемых фотомеханических эффектов, т.е. деформаций и разрушения материала мишени из-за возникающих термоупругих напряжений [5], приводящих к образованию крупных частиц.

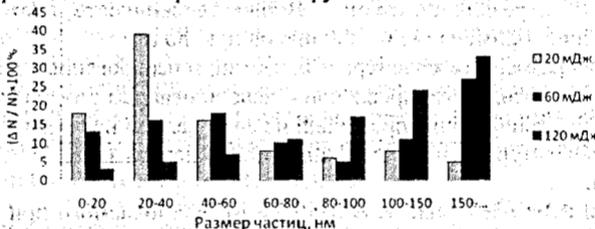


Рисунок 2 – Размерное распределение частиц, полученных при ИЛА политетрафторэтилена в воде при различных значениях энергии в импульсе лазерного излучения

При уменьшении длины волны лазерного излучения при прочих равных условиях наблюдается увеличение доли более крупных частиц (рис. 3).

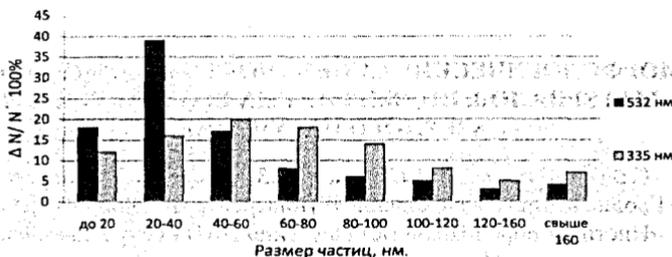


Рисунок 3 – Размерное распределение частиц, полученных при ИЛА политетрафторэтилена в воде при различных значениях длины волны лазерного излучения (энергия в импульсе – 20 мДж).

Можно предположить, что переход длины волны излучения лазера из видимого диапазона (532 нм) в ближний ультрафиолет (355 нм) сопровождается более интенсивным энергетическим воздействием на мишень с реализацией описанных выше механизмов образования крупных частиц.

Приведенные результаты справедливы для абляции политетрафторэтилена, находящегося под слоем жидкости в 6 мм. Принципиальных качественных и количественных различий в результатах экспериментов при толщине слоя жидкости от 3 до 12 мм не зафиксировано. Эксперименты показали, что при расположении мишени на глубине меньше 3 мм при используемых нами значениях энергии в импульсе лазерного излучения воспроизводимость результатов низкая. Возможно, это связано с выбросом части продуктов абляции за пределы кюветы с брызгами жидкости, образующимися при микровзрывах. При помещении мишени на глубины большие, чем 12 мм, усиливается роль поглощения излучения в жидкости.

**Заключение.** Экспериментально установлено, что при импульсной лазерной абляции политетрафторэтилена в дистиллированной воде образуются частицы наноразмерного и субмикронного уровня. Показано, что увеличение энергии в импульсе и уменьшение длины волны лазерного излучения способствуют образованию более крупных частиц.

Работа выполнена в рамках задания 2.3.11. Государственной программы научных исследований «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы».

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поул, Ч. Нанотехнологии / Ч. Поул – мл., Ф. Оуэнс. – Москва: Техносфера, 2006. – 336 с.
2. Гракович, П.Н. Лазерная абляция политетрафторэтилена / П.Н. Гракович [и др.] // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – 2008. – т. LI, № 3. – С. 97-105.
3. Голодков, О.Н. Влияние гамма-облучения на лазерную абляцию поликетона / О.Н. Голодков [и др.] // Взаимодействие излучения с твердым телом: материалы 10-й. Междунар. конф. Минск, 24-27 сентября 2013г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; ред. кол.: В.М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2013. – С. 24-26.
4. Симакин, А.В. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях / А.В. Симакин [и др.] // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. – 2004. – Том 64. – С. 83-107.
5. Булгаков, А.В. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество / А.В. Булгаков [и др.] // – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. – 462 с.

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

*Е.В.Овчинников, В.А.Струк, К.Ф.Зноско, Е.И.Эйсымонт*

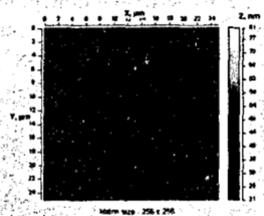
Гродненский государственный университет им.Янки Купалы  
ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Республики Беларусь,  
Гродно, Республика Беларусь

Перспективными материалами для применения в машиностроении, агропромышленном комплексе химической промышленности, сфере здравоохранения являются наноконпозиционные материалы. В большинстве случаев наноконпиты получают путем введения низкоразмерного активного вещества в объем материала (металлы, полимеры, смазочные материалы и т.п.). Для увеличения модифицирующего эффекта применяют предварительную активацию модификатора или матрицы, используя в основном механические, химические, электрические методы активации исходных компонент. Применение лазерного излучения (ЛИ) для активации полимерных материалов, в том числе и нанодисперсных частиц является в настоящее время перспективным направлением для исследований в области физики конденсированного состояния, материаловедения.

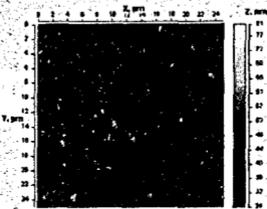
В настоящее время разрабатываются предпосылки для описания структурных изменений, происходящих в тонких поверхностных слоях дисперсных частиц различного строения, состава и технологии получения, под действием лазерного излучения. На активацию поверхностных слоев полимеров, а также получаемых частиц в результате абляции при воздействии ЛИ в значительной степени будет оказывать влияние длина волны лазерного излучения, энергия импульса, угол падения пучка ЛИ на подложку, геометрические параметры образца, оптические характеристики субстрата и т. д.

Целью является изучение морфологии полимерных материалов, подвергнутых воздействию импульсного лазерного излучения.

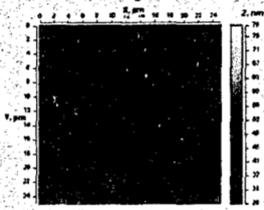
Для проведения исследований использовали плёночные и объёмные полуфабрикаты в состоянии промышленной поставки толщиной от 100 до 3000 мкм, получаемые методами литья под давлением (ПА 6 и его композиции), прессования с последующим спеканием (ПТФЭ), экструзии через плоскошелевую головку (ПЭТФ). Перед обработкой ЛИ плёночные образцы очищали от механических загрязнений путем обработки этиловым спиртом. Для модифицирования образцов из полимерных материалов использовали лазерные установки «Квант-15», «Lotis» генерирующие лазерное излучение с длиной волны  $\lambda_0=1,06$  мкм,  $\lambda_0=0,532$  мкм и длительностью импульса  $1,2 \cdot 10^{-6}$  с и  $16 \cdot 10^{-9}$  с соответственно. Количество импульсов при обработке варьировали от 1 до 10. Перед обработкой ЛИ образцы очищали от механических загрязнений путем обработки этиловым спиртом. Для исследований применяли методы атомно-силовой и растровой электронной микроскопии. Проведенные ранее исследования [1] показали возможность активации полимерных материалов при воздействии лазерного излучения (рис.1).



а



б



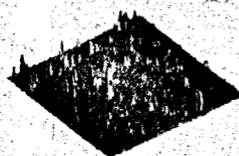
д

20.0 x 20.0 μm  
A = 46.5 nm  
Ra = 8.9 Rq = 19.2



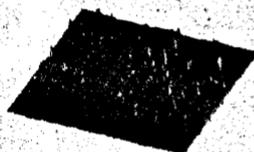
б

24.7 x 24.7 μm  
A = 89.1 nm  
Ra = 25.2 Rq = 51.0



г

25.0 x 25.0 μm  
A = 207.1 nm  
Ra = 9.0 Rq = 20.7

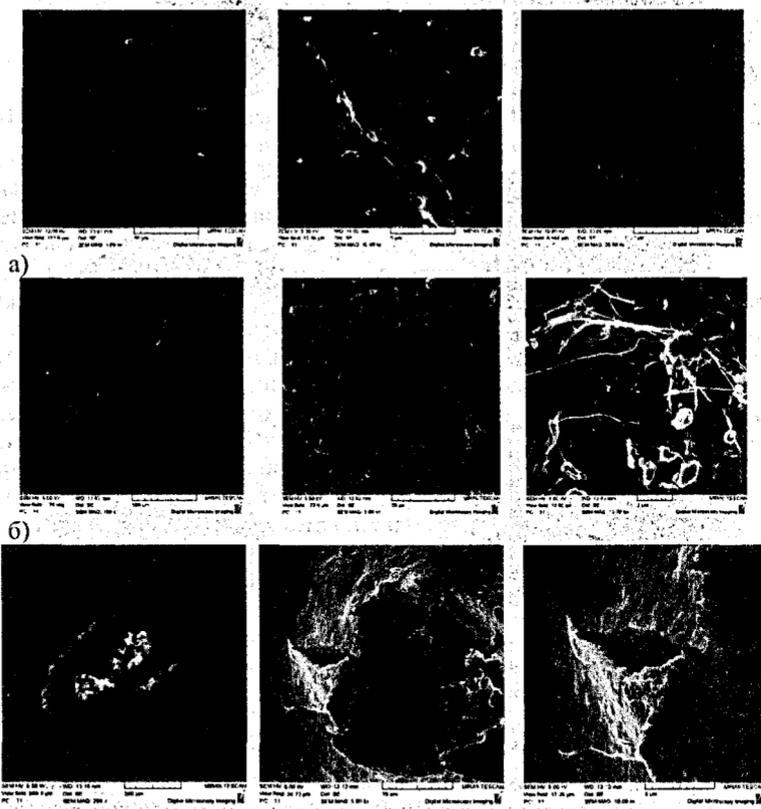


е

Рисунок 1 – Характерный вид поверхности пленки из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), обработанной многоимпульсным лазерным излучением с частотой 10 Гц при напряжении накала  $U=500$  в (а, б), 600 в (в, г), 700 в (д, е); б, в, г – трехмерное изображение. Поле сканирования  $25 \times 25$  мкм [1]

Из полученных методом атомно-силовой микроскопии изображений видно, что воздействие лазерного излучения приводит к образованию развитой морфологии. Однако дальнейшее увеличение энергии импульса (рис.1 д,е) сглаживает исходный рельеф обрабатываемого полимерного материала. Данный факт достаточно сложно объяснить, так как увеличение энергии в импульсе должно приводить к интенсификации абляции фрагментов полимерного материала и увеличению шероховатости материала. Возможно, данный эффект объясняется применяемым для изучения методом исследований - атомно-силовой микроскопией, которая позволяет проводить исследования выбранных мест размером  $25 \times 25$  мкм и менее в зависимости от типа используемого прибора. Поэтому имеющиеся в литературных источниках сведения часто не коррелируют с установленными эффектами изменения топографии поверхностных слоёв обработанных образцов, параметров надмолекулярной структуры, упрочнения и др. [1-3]. Применение растровой электронной микроскопии позволяет более полноценно оценить характер воздействия лазерного излучения на полимерные ма-

териалы. На рис.2 представлены морфологические изменения поверхностных слоев полимерных материалов и топология получаемых частиц при лазерном излучении: Данные изображения получены при различных увеличениях.



а) исходный полимер; б) ПТФЭ, модифицированный лазерным излучением, энергия в импульсе 1 мДж; в) ПТФЭ, модифицированный лазерным излучением, энергия в импульсе 6 мДж.

Рисунок 2 – Морфология политетрафторэтилена, подвергнутого воздействию лазерного излучения

Очевидно, что наблюдаемые эффекты трансформирования структуры характеристик полимерных полуфабрикатов обусловлены прежде всего изменением энергетического состояния полимерных макромолекул и компонентов, входящих в состав технических полуфабрикатов, т. к. известно, что даже при относительно небольших энергетических потоках (с точки зрения промышленных технологий и применяемых в машиностроении геометрических параметров комплектующих) возможно изменение состояния полимерных и олигомерных макромолекул, приводящее к структурированию, деструкции, абляции и надмолекулярному упорядочению [1-3].

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трансформирование структуры поверхностных слоев полимерных полуфабрикатов под действием высокоэнергетических потоков / В.Г. Сорокин, Е.И. Эйсымонт, В.А. Струк // Инженерный вестник. – 2009. – №2. – С.118-125.
2. Авдэйчик, С.В. Морфология полимерных материалов после высокоэнергетической обработки / С.В. Авдэйчик, В.В. Гаврилова, С.А. Плещак // Вестник ГрГУ. – 2007. – №4. – С. 31 – 45.
3. Ионин, А.А. Селективная по частоте поверхностная обработка полимерных материалов излучением CO<sub>2</sub>-лазера. / А.А. Ионин [и др.]. // Кваптовая электроника. – 1999. – Т. 24, № 8. – С. 764-767.

УДК: 519.6+539.3

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ И ОБЛУЧЕНИИ

Ширель П.И.<sup>1</sup>, Куликов И.С.<sup>2</sup>

1) Белорусский национальный технический университет;

Минск, Республика Беларусь;

2) Смоленский государственный университет,

Смоленск, Российская Федерация

Задача определения неосесимметричного НДС цилиндрической области даже в упругой постановке является сложной, и ее решение, точно удовлетворяющее всем заданным граничным условиям, удавалось получать при очень сильных предположениях. Как правило, в литературе рассматриваются различные неосесимметричные задачи, когда компоненты упругого перемещения и напряжения допускают разложения в тригонометрические ряды. Большинство попыток получения таких решений связаны с разложением нагрузки в ряд Фурье, который для цилиндров бесконечной длины приводит к представлению в виде интегралов Фурье. Такой подход, однако, вызывает вопросы при немеханических нагружениях, а также не позволяет полностью удовлетворить условиям на торцах. Существенно расширить круг решаемых неосесимметричных задач позволяют приближенные численные методы. Заметим, что при наличии распухания и ползучести приведенное утверждение является абсолютным.

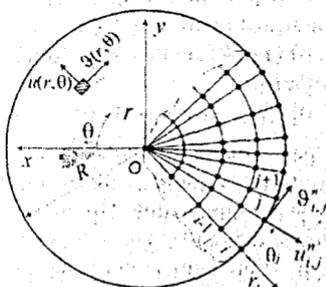


Рисунок 1 – Расчетная область неосесимметричной задачи

Для реализации численного подхода, в области независимых переменных ( $0 \leq \theta \leq \theta^0$ ,  $0 \leq r \leq R$ ) из линий  $\theta = \text{const}$  и  $r = \text{const}$  строилась криволинейная структурированная сетка, связанная с границами интегрируемой области (рис. 1). Специальные дифференциальные операторы нелинейной системы [1] аппроксимируем их конечно-разностными аналогами с учетом физических особенностей расчетной области. Для этого отрезок  $[0, R]$  разбивается равноотстоящими точками:  $r_0 = 0$ ,  $r_k = R$ ,  $r_i = ih_r$ ,  $h_r = R/k$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$ . Аналогично разобьем отрезок  $[0, \theta^0]$ :  $\theta_0 = 0$ ,

$\theta_m = \theta^0$ ;  $\theta_i = jh_\theta$ ,  $h_\theta = \theta^0 / m$ ,  $j = -1, 0, 1, \dots, m-1$ , где  $h_r$  и  $h_\theta$  — шаги сетки в радиальном и окружном направлениях. Заметим, что слой по кольцевой координате  $j=-1$  (т.е. плоскость  $\theta = -h_\theta$ ) является вспомогательным и служит исключительно для аппроксимации граничных условий. Регулярная структура такой сетки в дальнейшем должна позволить организовать эффективную работу с разреженными матрицами при решении систем уравнений, причем матрицы коэффициентов системы будут полизаполненными. Для получения конечно-разностных уравнений заменим функции непрерывного аргумента  $u$  и  $\vartheta$  их разностными, дискретными эквивалентами.

При построении шаблона использовались неявные разностные схемы с весовыми коэффициентами. В основу предлагаемого численного метода решения полученной разностной системы уравнений на основе [1] заложены метод конечных разностей, метод матричной прогонки, идеи метода дробных шагов Н.Н. Яненко, теория аппроксимации, интерполяции и экстраполяции функции, а также итерационные методы. Окончательно дискретная система, описывающая общий случай неосесимметричного НДС в условиях терморadiационного нагружения была представлена в виде:

$$\begin{cases} \chi_{li} u_{i+1,j+1}^n - (1 + 2\chi_{li}) u_{i,j+1}^n + \chi_{1i} u_{i-1,j+1}^n = d_{i,j}^n; \\ \xi_{li} \vartheta_{i+1,j+1}^n - (1 + 2\xi_{li}) \vartheta_{i,j+1}^n + \xi_{1i} \vartheta_{i-1,j+1}^n = k_{i,j}^n. \end{cases} \quad (1)$$

$$\chi_{li} = \frac{2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2}{2\mu-1} \frac{h_\theta^2}{h_r^2} \alpha; \quad \chi_{2i} = \frac{2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2}{2\mu-1} \frac{h_\theta^2}{h_r^2} \beta;$$

$$\xi_{li} = \frac{r_i^2(1-2\mu)h_\theta^2}{2(\mu-1)} \frac{h_\theta^2}{h_r^2} \alpha; \quad \xi_{2i} = \frac{2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2}{2\mu-1} \frac{h_\theta^2}{h_r^2} \beta.$$

Здесь  $d_{i,j}^n$ ,  $k_{i,j}^n$  — функции от перемещений на предыдущих слоях по окружной координате  $(j, j-1)$ :  $d_{i,j}^n = -2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n(1 - \chi_{2i}\Lambda_2) - F_{li}^n(u_{i,j}, \vartheta_{i,j})H_i$ ,

$H_i = 2r_i^2(1-\mu)h_\theta^2/(2\mu-1)$ ;  $k_{i,j}^n = -2\vartheta_{i,j}^n + \vartheta_{i,j-1}^n(1 - \xi_{2i}\Lambda_2) - F_{2i}^n(u_{i,j}, \vartheta_{i,j})M_i$ ,

$M_i = r_i^2(1-2\mu)h_\theta^2/(2\mu-2)$ ;  $\alpha + \beta = 1$ .

Где нелинейные члены  $F_1$  и  $F_2$  определяются по выражениям, представленным в конечно-разностной форме, включающим частные производные от искоемых функций и неупругие слагаемые в правой части (1): термическое расширение, радиационное распухание, деформации ползучести.

Для определения неизвестных функций  $u_{i,j+1}$ ,  $\vartheta_{i,j+1}$  на каждом шаге по окружной координате имеем систему уравнений с граничными условиями, которые в общем виде для  $n$ -го временного этапа деформирования переписываются в дискретной форме по формулам численного дифференцирования. Причем условия в напряжениях первоначально конвертируются относительно перемещений через физические уравнения и формулы Коши. Полученные системы разностных уравнений имеют матрицы трехдиагональной структуры и могут быть решены по методу матричной прогонки, на основе модификации разработанной в [1] численной схемы. Так, система (1) расплывается на две системы, которые

решаются прогонами с учетом параметра времени  $t$ : первая – по радиальному перемещению, а вторая – по окружному.

Прогонка осуществляется по радиусам, которые для каждого луча начинаются в центре сечения и оканчиваются на границах исследуемой области. Такие прогоны имеют свои особенности, вызванные характером сетки, расчетной областью и видом рассматриваемых физически нелинейных эффектов. По окончании текущего шага расчета в алгоритме, реализующем механико-математическую модель с учетом необратимых деформаций, фиксируются величины, характеризующие НДС каждой точки по периметру модельного тела в конце  $n$ -го этапа нагружения, и начинается расчет  $(n+1)$ -го этапа. В результате, для получения решения на следующем  $n+1$  временном слое решается новая система неоднородных линейных уравнений по изложенной выше численной методике. Таким образом, для любого текущего момента времени  $t_n$  имеем полную замкнутую систему из  $2km$  неоднородных алгебраических уравнений с  $2km$  неизвестными. Общая схема численного решения представлена на рис. 2. Необ-

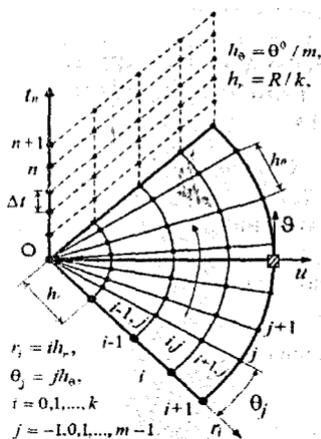


Рисунок 2 – Численная схема разбиения сечения модели

ходимая точность в процессе решения достигается, с одной стороны, измельчением шага криволинейной структурированной сетки в радиальном и окружном направлениях, с другой стороны, повышением степени порядка аппроксимации выражений производных в конечных разностях.

В [2–4] рассмотрены особенности реализации разработанной механико-математической модели, которая включала моделирование обобщенного плоского квазистатического деформированного состояния ( $\epsilon_{zz} = C(t) \neq 0$ ) и отдельную процедуру вычисления необратимых деформаций. При определении деформаций ползучести на каждом временном шаге использовалась теория течения с учетом радиационной составляющей. Деформации радиационного распухания на каждом этапе нагружения определялись с по-

мощью эмпирических зависимостей, полученных на основе внутриреакторных испытаний тепловыделяющих и конструкционных материалов. Для проведения дальнейших исследований реализован алгоритм расчета неосесимметричного НДС и компьютерная программа решения 2D( $r, \theta$ ) задачи ползучести в условиях облучения. Программная модель реализована на C# в среде Microsoft Visual Studio 2011 и позволяет обрабатывать и визуализировать результаты расчетов цилиндрических тел (сплошной, полый, многослойный цилиндры) для различных типов граничных условий и видов физической нелинейности (радиационное распухание, ползучесть). Архитектура программного комплекса является модульной, что дает возможность в дальнейшем добавлять новые функциональные возможности и вносить улучшения.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Куликов, И.С. О неосесимметричном НДС неравномерно нагретых длинных цилиндрических тел в условиях ползучести и облучения / И.С. Куликов, А.В. Чигарев, П.И. Ширвель // *Материалы VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела: в 2 ч.* – Чебоксары, 2014. – Ч.2. – С. 5–16.
2. Чигарев, А.В. Исследование неосесимметричного напряженного состояния при квазистатическом термосиловом нагружении в условиях облучения высокоэнергетическими частицами / А.В. Чигарев, П.И. Ширвель // *Наука и Техника.* – 2013. – №4. – С. 46–53.
3. Ширвель, П.И. Неосесимметричное напряженно-деформированное состояние длинного тепловыделяющего цилиндра в условиях квазистатического терморadiационного воздействия / П.И. Ширвель, И.С. Куликов, А.В. Чигарев // *Теор. и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб.* – Минск: БНТУ, 2014. – Вып. 29. – С. 79–85.
4. Ширвель, П.И. Численное моделирование процессов деформирования элементов конструкций и компонентов оборудования ЯЭУ / П.И. Ширвель, А.В. Чигарев, А.А. Сергей // *Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб.* – Минск: БНТУ, 2014. – Вып. 29. – С. 173–178.

УДК 539.3

## НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕРМОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПРОБИВНОГО ПУАНСОНА

*Веремейчик А.И.<sup>1</sup>, Гарбачевский В.В.<sup>1</sup>, Сазонов М.И.<sup>1</sup>,  
Хвусевич В.М.<sup>1</sup>, Цыганов Д.Л.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь;

<sup>2</sup>Институт физики плазмы и ядерного синтеза,  
Лиссабон, Португалия

Для процесса поверхностного плазменного упрочнения рабочей зоны цилиндрических пуансонов для пробивки отверстий применялся плазмотрон с высокой удельной мощностью. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон, причем в плазмотроне было применено обжимающее сопло с диаметром отверстия 1,2 мм. Струя плазмы шириной 2,8 мм направлялась на торцы пуансонов, которые обжаты двумя медными пластинами для их интенсивного охлаждения и собраны в обжим. При движении плазмотрона производится последовательные интенсивный нагрев и закалка их торцов. Схема приспособления приведена на рисунке 1.

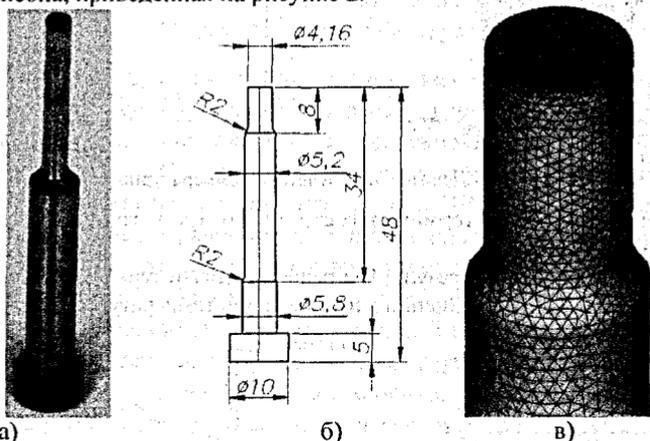
Рисунок 1 – Приспособление для интенсивного теплоотвода



Сначала плазмотрон перемещается относительно пуансонов вдоль их торцевых поверхностей, затем их поворачивают на  $90^\circ$ , и движение повторяется. Таким образом достигается закалка торца и режущей кромки пуансонов. Плазменная закалка производилась при токах дуги  $I = 6 - 32$  А. Скорость перемещения плазмотрона варьировалась от 4 до 27 мм/с. В результате проведенных экспериментов и статической обработки их результатов были определены оптимальные параметры процесса поверхностного упрочнения: скорость перемещения плазмотрона  $V = 9 - 13$  мм/с, ток дуги  $I = 27$  А, расход защитного газа  $Q = 3,1$  л/мин. Эти параметры зависят от расстояния плазмотрона до поверхности торцов пуансонов.

Проведено исследование нестационарных температурных полей, напряжений и перемещений при поверхностной закалке, выполненное с применением конечно-элементного комплекса ANSYS. Следует отметить, что основой термического анализа в пакете ANSYS является уравнение теплового баланса, которое получается из принципа сохранения энергии. Конечно-элементное решение заключается в получении значений узловых температур и напряжений, на основе которых вычисляются остальные необходимые величины.

В ходе проведения вычислительного эксперимента разработана трехмерная модель пуансона, приведенная на рисунке 2.



а) внешний вид; б) схема; в) конечно-элементная модель рабочей зоны  
Рисунок 2 – Пуансон

При решении нестационарной температурной задачи использовался предназначенный для анализа переходных процессов восьмиузловой термический элемент SOLID70 (Brick 8node), который имеет одну степень свободы (температура в каждой точке), при структурном анализе - восьмиузловой элемент SOLID185 (Brick 8node). В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам дискретной модели пуансона пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде теплового потока. Максимальная температура поверхности торца пуансона составляет  $1300^\circ\text{C}$  (начальная температура  $20^\circ\text{C}$ ). На всех поверхностях модели задавалась конвекция: на торцевой поверхности, по которой движется плазменная струя, коэффициент конвекции

составлял  $50 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$ , на боковой цилиндрической -  $100 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$ . Теплопроводность стали X12M принималась равной  $50 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м})$ , модуль упругости  $E=2\cdot 10^{11} \text{ Па}$ , коэффициент Пуассона  $\nu=0,28$ . Скорость движения плазмотрона равна  $11 \text{ мм}/\text{с}$ . Нагрев пуансонов производится в течение  $0,346 \text{ с}$ , а интенсивное охлаждение - в течение  $2-7 \text{ с}$ .

После каждого шага нагружения проводился расчет температурных полей, результаты которого записывались в LS-файлы. Для получения общего решения выполнялось совместное решение по определенному количеству LS-файлов, соответствующее 22 шагам нагружения. В результате проведения расчета определены поля температур, напряжений и перемещений в различные промежутки времени.

На рисунке 3а представлено распределение температурных полей на рабочей зоне пуансона в момент времени  $t=0,346 \text{ с}$ , на рисунке 3б - зависимость температуры от времени в средней точке торца.

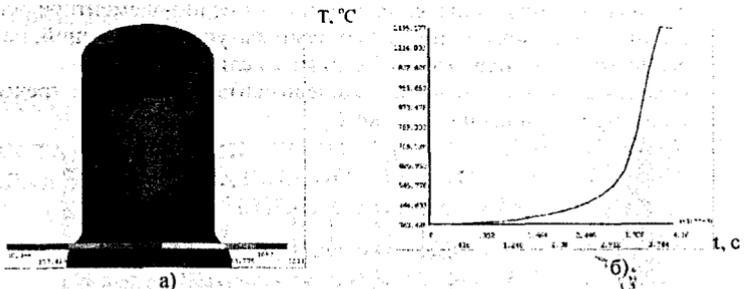


Рисунок 3 - Некоторые результаты температурного анализа

При решении задачи термоупругости плазмотрон закреплялся по нижней торцевой поверхности.

На рисунке 4 приведены результаты решения задачи термоупругости по определению напряжений и перемещений в пуансоне при температурной нагрузке.

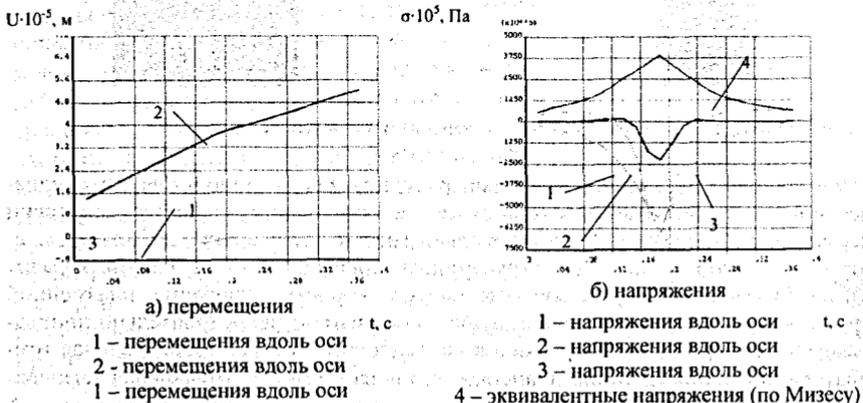


Рисунок 4 - Зависимость перемещений и напряжений в средней точке рабочего торца пуансона от времени

Отрицательные напряжения при  $t = 0,173$  с можно объяснить «выдавливани-ем» материала в зоне, находящейся непосредственно перед плазменной струей, в результате увеличения объема материала непосредственно в месте нагрева.

Полученные результаты нестационарного температурного и структурного анализа могут быть непосредственно использованы для определения оптимальных режимов работы плазмотронов и других высококонцентрированных источников нагрева, позволяющих проводить поверхностную обработку металлоизделий высокотемпературной плазменной струей.

УДК 539.3+621.039.54

### НДС НЕРАВНОМЕРНО НАГРЕТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ И ОБЛУЧЕНИИ

*Ширвель П.И., Чигарев А.В.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Вопросы моделирования процессов деформирования сплошных сред в условиях сложных техногенных воздействий рассмотрены в [1–4], но при этом в них не в полной мере учитывались все особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) при таких условиях нагружения. В некоторых случаях (осесимметричный нагрев) при определении НДС оправдано использование одномерной осесимметричной модели цилиндрических тел. Однако воздействие неоднородного в окружном направлении температурного поля в условиях интенсивного облучения высокоэнергетическими частицами неизбежно приводит к появлению дополнительных напряжений. Таким образом, компоненты тензора деформаций, тензора напряжений и вектора перемещений будут зависеть как от радиальной, так и от окружной координат материальных точек тела. В таком случае необходимо рассматривать неосесимметричное НДС, под которым подразумевается зависимость характеристик деформирования не только от радиуса, но и от меридионального угла (т.е. в плоскостях, проходящих через ось вращения, не возникает одинаковое напряженное и деформированное состояние для текущей радиальной координаты).

В настоящей работе рассматривается неосесимметричное НДС массивного цилиндрического тела, осевое сечение которого образует ограниченную связанную область с кусочно-гладкой границей. Считается, что для любого осевого сечения цилиндра характерно неоднородное распределение температуры  $T(r, \theta)$ , напряжений  $\sigma_{ij}(r, \theta)$  и деформаций  $\epsilon_{ij}(r, \theta)$ ,  $i, j = r, \theta, z$ . Цилиндрическое тело находится в условиях обобщенной плоской деформации ( $\epsilon_{zz} = \text{const}$ ), а все осредненные параметры и константы (свойства материалов, температура, скорость пото-

ка высокоэнергетических частиц и т.п.) не изменяются со временем. Также предполагаем, что процесс деформирования не оказывает существенного влияния на температурное поле тела, т.е. рассматривается несвязанная задача, решаемая в квазистатической постановке в предположении, что процессы нагрева, механического нагружения и облучения протекают настолько медленно, что в каждый отдельный момент времени объект исследования находится в равновесном состоянии. На рис. 1 изображена схема деформирования сплошной цилиндрической области под действием внешнего равномерного давления  $P_{ext}(t)$ , находящейся в стационарном неосесимметричном поле температур  $T(r, \theta)$  и подверженной облучению потоком быстрых нейтронов ( $\bar{E} > 0.1$  МэВ) суммарным флюенсом  $\Phi(t)$ . Распределение флюенса нейтронов по сечению описывается эмпирическими соотношениями, установленными на основе экспериментальных данных [4], температура определяется на основе решения задачи теплообмена с окружающей средой. Для описания процессов ползучести используем соотношения теории течения, обобщенные на общий случай радиационного облучения Ю.И. Лихачевым [1]. Таким образом, деформации терморadiационной ползучести, определяемые температурно-радиационными условиями и временем пребывания в этих условиях, подчиняются общим соотношениям, предполагающих пропорциональность компонент девиаторов напряжений и скоростей деформаций [2].

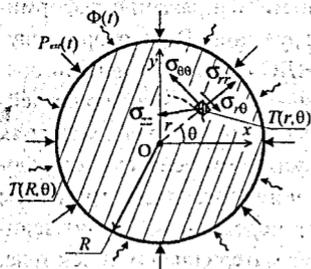


Рисунок 1 – Общая схема неосесимметричного НДС

Принятые допущения позволяют разработать соответствующую механико-математическую модель для решения поставленной задачи, которая заключается в определении НДС длинных тел, неравномерно нагретых в радиальном и окружном направлении, с учетом влияния облучения и физически нелинейных эффектов поведения материала. Общая задача определения неосесимметричного НДС состоит в том, чтобы отыскать 10 функций (компоненты вектора перемещений, тензора напряжений и тензора деформаций), причем таких,

чтобы они удовлетворяли дифференциальным уравнениям равновесия, а также физическим и геометрическим соотношениям, а на всех точках граничной поверхности – граничным условиям.

В соответствии с вышесказанным, получены дифференциальные уравнения равновесия в перемещениях, описывающие неосесимметричное НДС цилиндрических тел при ползучести и облучении [5]. Принимая за искомые функции  $u(r, \theta)$  и  $v(r, \theta)$ , дальнейшее решение задачи сводится к интегрированию системы двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами относительно перемещений. Разрешающая система дифференциальных уравнений записана в окончательном виде как

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{2r^2(1-\mu)} \left( (1-2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + r \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r \partial \theta} - (3-4\mu) \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} \right) = \right. \\
 & = \frac{1-2\mu}{(1-\mu)r} \left( \epsilon_{rr}^c - \epsilon_{\theta\theta}^c + \frac{\partial \epsilon_{r\theta}^c}{\partial \theta} \right) + \frac{\mu}{1-\mu} \left( \frac{\partial \epsilon_{\theta\theta}^c}{\partial r} + \frac{\partial \epsilon_{zz}^c}{\partial r} \right) + \frac{\partial \epsilon_{rr}^c}{\partial r} + \\
 & \left. + \frac{1+\mu}{1-\mu} \left( \frac{\partial \epsilon^{th}}{\partial r} + \frac{\partial \epsilon^s}{\partial r} \right); \right. \quad (1) \\
 & \left. \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} - \frac{\vartheta}{r^2} + \frac{1}{r^2(1-2\mu)} \left( 2(1-\mu) \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} + r \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial \theta} + (3-4\mu) \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) = \right. \\
 & = \frac{4}{r} \epsilon_{r\theta}^c + 2 \frac{\partial \epsilon_{r\theta}^c}{\partial r} - 2 \left( \frac{\partial \epsilon_{\theta\theta}^c}{\partial \theta} (\mu-1) - \mu \left( \frac{\partial \epsilon_{rr}^c}{\partial \theta} + \frac{\partial \epsilon_{zz}^c}{\partial \theta} \right) \right) + \frac{2(1+\mu)}{r(1-2\mu)} \left( \frac{\partial \epsilon^{th}}{\partial \theta} + \frac{\partial \epsilon^s}{\partial \theta} \right)
 \end{aligned}$$

Здесь приняты следующие обозначения:  $\epsilon_{ij}^{th}$ ,  $\epsilon_{ij}^s$ ,  $\epsilon_{ij}^c$  – компоненты тензоров неупругих деформаций термического расширения, радиационного распухания (свеллинг) и ползучести соответственно;  $\mu$  – значения коэффициента Пуассона (характерные для конкретного диапазона действующих температур и облучения).

Исходя из общей схемы нагружения для сплошного цилиндра, система (1) дополняется смешанными граничными условиями:

$$u(0, \theta) = \vartheta(0, \theta) = 0, \quad (2)$$

$$\sigma_{rr}(R, \theta) = -P_{ext}(t); \quad \sigma_{r\theta}(R, \theta) = 0. \quad (3)$$

По приведенным выше зависимостям в дальнейшем необходимо определить распределение перемещений, напряжений и деформаций во всех точках по периметру сечения длинного цилиндрического тела с течением времени  $t$ , которое выполняет роль параметра, определяющего кинетику изменения НДС.

Замыкают систему (1) условия, обусловленные особенностями решения в перемещениях с точностью до поступательного перемещения тела в целом

$$\frac{\partial u(r, \theta)}{\partial \theta} = \frac{\partial \vartheta(r, \theta)}{\partial \theta} = 0, \quad \theta = 0, \theta^0, \quad (4)$$

где  $\theta^0$  может принимать различные значения в зависимости от закона распределения заданной функции температур  $T(r, \theta)$  по периметру сечения;  $0 \leq \theta \leq \theta^0$  – условие периодичности решения, определяемое периодом функции распределения температур. Граничные условия на торцах не рассматриваются, так как цилиндр считается длинным, и анализируются сечения, достаточно удаленные от торцов (в соответствии с принципом Сен-Венана).

Без ограничения общности построения механико-математической модели, рассмотренный случай может быть дополнен моделями деформирования полого (рис.2) и многослойного цилиндров.

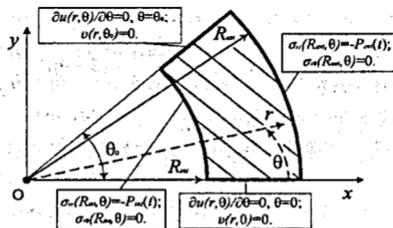


Рисунок 2 – Расчетная область и условия на границе длинного тела двусвязной цилиндрической геометрии

В случае многослойного цилиндрического тела, считая, что соседние слои не имеют свободы перемещений относительно друг друга, предполагается дополнительно задавать:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^I(R_{ext}^I) &= \sigma_{rr}^{I+1}(R_{int}^{I+1}); \sigma_{r\theta}^I(R_{ext}^I) = \sigma_{r\theta}^{I+1}(R_{int}^{I+1}); \\ u^I(R_{ext}^I) &= u^{I+1}(R_{int}^{I+1}); \vartheta^I(R_{ext}^I) = \vartheta^{I+1}(R_{int}^{I+1}). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $I=1, 2, \dots, J$  – номер слоя,  $J$  – количество слоев;  $R_{int}^I, R_{ext}^I$  – радиусы  $I$ -го слоя.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лихачев, Ю.И. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов / Ю.И. Лихачев, В.Я. Пулко. – М.: Атомиздат, 1975.
2. Куликов, И.С. Прочность элементов конструкций при облучении / И.С. Куликов, В.Б. Нестеренко, Б.Е. Твердовкин. – Минск: Наука і тэхніка, 1990. – 143 с.
3. Писаренко, Г.С. Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках / Г.С. Писаренко. – К.: Наук. думка, 1979.
4. Olander, D. R. Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements / D.R. Olander. – USA: Technical Information Center Energy Research and Development Administration, 1976. – 720 p.
5. Ширвель, П.И. Модель расчета несосимметричного напряженно-деформированного состояния облучаемых тел цилиндрической геометрии в условиях ползучести / П.И. Ширвель, И.С. Куликов // Весті НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук.–2012.–№ 4.–С. 51–62.

УДК 539.3

### ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ТЕРМОУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ НАГРЕВЕ И ОБЛУЧЕНИИ

*Хвусевич В.М., Веремейчик А.И., Гарбачевский В.В., Мороз Е.А.*

Брестский государственный технический университет,

Брест, Беларусь

Основным конструктивным элементом активной зоны ядерного реактора является тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ). В современных энергетических реакторах сердечник ТВЭЛА представляет собой длинный цилиндрический стержень, работающий в условиях радиационного распухания и подверженный температурной нагрузке. От надежной работы ТВЭЛОВ зависит работоспособность всего реактора, поэтому исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) цилиндрических тел при терморadiационном нагружении приобретает особое практическое значение.

В данной работе рассматривается бесконечно длинный однородный цилиндр, который подвергается воздействию радиационной, температурной нагрузки и внешнего давления. Расчетная схема приведена на рисунке 1.

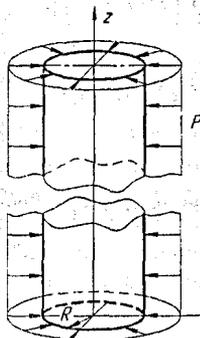


Рисунок 1 – Расчетная схема цилиндра

В связи со спецификой заданных нагрузок и с учетом физической и геометрической симметрии НДС цилиндра можно оценить, реализовав осесимметричную задачу теории упругости.

Дифференциальное уравнение равновесия имеет вид:

$$\sigma_r - \sigma_\theta + r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0, \quad (1)$$

где  $\sigma_r, \sigma_\theta$  - радиальное и касательное напряжение,  $r$  - переменный радиус. Граничные условия задачи:  $u_r = 0$  при  $r = 0$ ,  $\sigma_r = -P$  при  $r = R$ , где  $P$  - внешнее давление,  $R$  - наружный радиус цилиндра.

Эмпирическая функция радиационного распухания принимается согласно [1]:

$$S(T(r), t) = 4,9 \cdot 10^{-51} \cdot (\Phi \cdot t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{15490}{T} - \frac{5,98 \cdot 10^6}{T^2}}, \quad (2)$$

где  $t$  - время,  $\Phi$  - нейтронный поток,  $T$  - температурное поле как функция координаты:

$$T = T_s + \frac{q_v}{4\lambda} (R^2 - r^2), \quad (3)$$

$T_s$  - температура на наружной поверхности,  $q_v$  - объемное тепловыделение,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала.

Уравнения обобщенного закона Гука при температурном и радиационном нагружении:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) + \alpha \cdot T(r) + \frac{S(T(r), t)}{3}, \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)) + \alpha \cdot T(r) + \frac{S(T(r), t)}{3}, \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)) + \alpha \cdot T(r) + \frac{S(T(r), t)}{3}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения материала.

Геометрические соотношения Коши, связывающие перемещения и деформации:

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_z = 0. \quad (5)$$

Учитывая (4), (5), выразим компоненты напряжений рассматриваемой задачи через перемещения:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \left( (1-\nu) \cdot \frac{du_r}{dr} + \nu \cdot \frac{u_r}{r} - (1+\nu) \cdot \left( \alpha \cdot T + \frac{S}{3} \right) \right),$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \left( (1-\nu) \cdot \frac{u_r}{r} + \nu \cdot \frac{du_r}{dr} - (1+\nu) \cdot \left( \alpha \cdot T + \frac{S}{3} \right) \right), \quad (6)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1-2\nu)} \cdot \left( \frac{\nu}{1+\nu} \cdot \left( \frac{du_r}{dr} + \frac{u_r}{r} \right) - \left( \alpha \cdot T + \frac{S}{3} \right) \right).$$

Решая совместно уравнения (1), (6), получим дифференциальное уравнение равновесия в перемещениях.

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \left( \alpha \cdot \frac{dT}{dr} + \frac{1}{3} \frac{dS}{dr} \right), \quad (7)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Решение полученного неоднородного дифференциального уравнения разыскивается в виде суммы  $\bar{u}_r$ , общего решения однородного уравнения

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = 0 \text{ и частного решения } u_r^*, \text{ неоднородного уравнения (7):}$$

$$u_r = \bar{u}_r + u_r^*. \quad (8)$$

Общее решение, удовлетворяющее однородному уравнению, имеет вид:

$$\bar{u}_r = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r}, \quad (9)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные интегрирования.

Для определения частного решения (6) применен принцип суперпозиции:  $u_r^* = u_{r1}^* + u_{r2}^*$ , где  $u_{r1}^*, u_{r2}^*$  – частные решения ДУ

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = \alpha \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{dT}{dr}, \quad (10)$$

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{dS}{dr} \quad (11)$$

соответственно.

Решение  $u_{r1}^*$  получено в виде:

$$u_{r1}^* = -\frac{1}{16} \cdot \frac{\alpha q_v}{\lambda} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot r^3. \quad (12)$$

Ввиду сложности эмпирической функции радиационного распухания подобрать частное решение (11) в аналитическом виде не удалось. Проведена аппроксимацию функции  $S$  полиномом 3-й степени  $y = A + Br + Cr^2 + Dr^3$ . Определение постоянных  $A, B, C, D$  ввиду громоздкости математических вычислений проводилось с учётом характеристик для материала ОХ16Н15МЗБ, где принято  $\Phi = 2,81 \cdot 10^{19}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ ,  $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $E = 1,5 \cdot 10^{11}$  Па,  $T_s = 700^\circ \text{C}$ ,  $\lambda = 12$  Вт/(м·град),  $q_v = 2,234 \cdot 10^8$  Вт/м $^3$ ,  $t = 1000$  ч. [1]. Окончательно получена следующая зависимость аппроксимирующей функции от радиуса:  $y = 0,002267 + 0,005185r + 75,309r^2 + 7316r^3$ .

Дифференциальное уравнение (11) с учетом аппроксимации принимает вид:

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = 0,005185 + 150,618r + 21948r^2. \quad (13)$$

Окончательно решение (7) с учетом граничных условий получено в виде:

$$u_r = 0,02255126r^2 + 0,00172833r^2 - 20,71654r^3 + 1463,2r^4. \quad (14)$$

Получены значения компонент напряжения  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  и деформаций  $\epsilon_r, \epsilon_\theta$  в зависимости от координаты. Исследована их зависимость от времени облучения и свойств материала. Кроме того, проведено исследование влияния температуры и радиационного распухания на напряжения в отдельности.

Типичные зависимости напряжений от радиуса для момента времени  $t=1000$  часов приведены на рисунке 2.

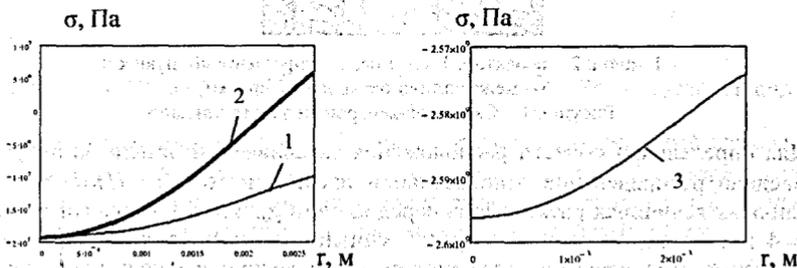


Рисунок 2 – Зависимость напряжений от радиуса

1 -  $\sigma_r$ , 2 -  $\sigma_\theta$ , 3 -  $\sigma_z$

Ввиду отсутствия аналитических решений, сравнение проводилось с результатами решения термоупругой задачи при отсутствии радиационного воздействия [2]. Результаты сравнения подтверждают правильность разработанной методики.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / Под ред. В.Б. Нестеренко. — Мн.: Наука и техника, 1984. — 103 с.
2. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. — М.: Наука, 1975. — 576 с.

УДК 533.9

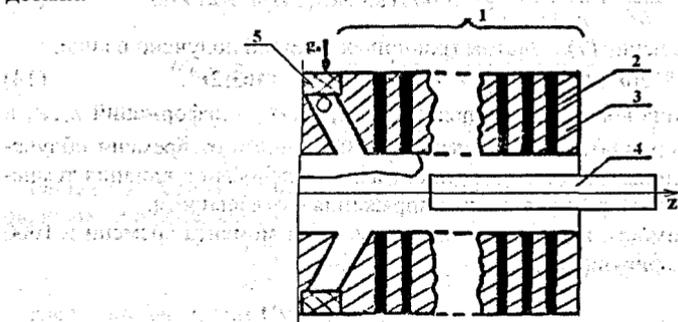
### ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА РАЗВИТЫМ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ

*Сазонов М.И., Веремейчик А.И.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Для разработки методики расчета теплообмена между развитым турбулентным потоком плазмы и деталями создан дуговой плазмотрон постоянного тока с секционированной электроразрядной камерой и анодом. Изучены распределения тока и тепловых потоков вдоль анода, определены зона шунтирования дуги в аноде и область размещения деталей для исследования теплообмена за этой зоной.

На рисунке 1 представлена схема анодного узла плазмотрона и нагреваемой детали.



1 – анод, 2 – изолятор, 3 – шайба, 4 – упорный пуансон,  
5 – межсекционное кольцо закрутки

Рисунок 1 – Схема плазмотрона и электропитания

Для определения области расположения закаливаемой детали на рисунке 2 приведено распределение относительной плотности тока  $\bar{i} = i / \pi d \cdot \Delta l \cdot I$  при различных величинах расхода газа перед анодом  $g_a$ . Здесь  $I$  – полный ток дуги,  $\Delta l = 4$  мм – толщина шайбы,  $i$  – усредненный по времени ток на шайбу анода. При отсутствии вдува газа перед анодом ( $g_a = 0$ ), величина  $\bar{i}$  составляет примерно  $1,1 \cdot 10^3$  м<sup>-2</sup> на первой шайбе анода и уменьшается до  $0,11 \cdot 10^3$  м<sup>-2</sup> при  $\bar{z} = 2,3$  (кривая 1). В этом случае большая часть тока протекает через первые шесть шайб анода, суммарная длина которых не превышает 1,5 калибра.

Эксперименты показали, что при постоянной величине расхода газа, вдуваемого в щель перед анодом, относительная плотность тока через шайбы не зависит от тока дуги в исследованном диапазоне параметров. Следовательно, при наличии развитого турбулентного течения газа в конце электродуговой камеры внутри анода практически весь ток дуги распределен на участке электрода длиной не более 1,5 калибра от внешнего края. Вследствие этого, с целью снижения до минимума тепловых потерь в анод длину электрода можно уменьшить до 1,5-2 калибров. Распределение относительной плотности тока вдоль анода

при установившемся течении газа приведено на рисунке 2.

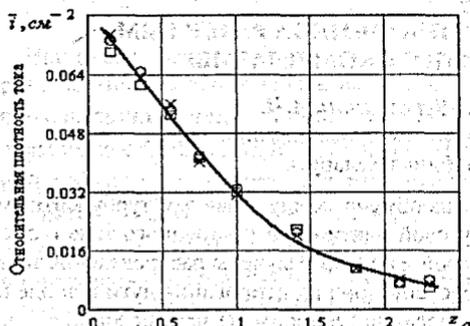


Рисунок 2 – Распределение относительной плотности тока вдоль анода для различных токов при развитом турбулентном течении плазмы

○ –  $I = 60$  А, × –  $I = 90$  А,  
○ □ –  $I = 120$  А

$d = 2$  см;  $\bar{a} = 20,5$ ;  $G_0 = 10 \frac{г}{с}$ ;  $g_a = 2,3 \frac{г}{с}$

Установлено, что при отсутствии вдува газа перед электродом величина теплового потока на первую секцию анода была максимальной и быстро снижалась на следующих. При наличии слабого вдува холодного рабочего газа перед анодом тепловой поток на первые шайбы значительно снижается благодаря реализации газовой завесы, а при достаточно сильных вдувах он может быть и ниже, чем на последующих секциях. На расстояниях больших 1,5 калибра от входа в анод тепловые потоки при одинаковых вдувах совпадают между собой и приблизительно равны по величине расчетному конвективному тепловому потоку. Зависимость распределения тепловых потерь вдоль анода рассчитывалась по формуле для конвективного теплообмена потока горячего газа со стеной трубы [1-3]:

$$q = St \rho v (h_0 - h_w). \quad (1)$$

Здесь  $St = 0,023 Re_d^{-0,2} \cdot Pr^{-0,6}$ ;  $Re_d = \frac{\rho v d}{\mu_0}$ ;  $h_0 = \frac{\eta N}{G}$ ;  $Pr$  - число Прандтля,

$\eta$  - к.п.д. межэлектродной вставки,  $N$  - мощность дуги,  $G$  - суммарный расход газа.

Тепловые потери в цилиндрическом аноде плазмотрона с МЭВ определяются конвективным теплопереносом от турбулентного потока плазмы к стенке, а также излучением столба дуги и тепловым потоком через пятно дуги:

$$Q = Q_k + Q_l + Q_n. \quad (2)$$

Лучистым тепловым потоком можно пренебречь, поскольку передача энергии излучением от дуги в процессе теплообмена в выходном электроде плазмотрона с МЭВ при атмосферном давлении и средних температурах воздуха до  $5 \cdot 10^{-3} K$  не превышает нескольких процентов от полного теплового потока в электрод.

Тепловой поток через анодное пятно в медный электрод в воздушной среде может быть оценен по формуле:

$$Q_n = 5,85I, \text{ Вт}. \quad (3)$$

Основной вклад в тепловой поток в стенку анода вносят конвективные тепловые потери. Удельный конвективный тепловой поток в цилиндрический выходной электрод может быть определен по формуле (1). В зоне шунтирования дуги в аноде к ним добавляется тепловой поток через пятно дуги и радиального участка дуги в аноде.

Расчет тепловых потерь в выходном электроде с учетом распределения токов дает удовлетворительное согласие с экспериментальными данными [3]. Сравнение экспериментальных и рассчитанных по вышеуказанной методике тепловых потерь в выходном электроде плазмотрона с межэлектродной вставкой приведено на рисунке 3. Наибольшее различие между расчетом и экспериментальными данными наблюдается на первых секциях анода при отсутствии вдува газа перед ним. Основную роль в интенсификации теплообмена в аноде играет реализация развитого турбулентного течения и вращение радиального участка дуги, обладающего высокой вязкостью по сравнению с окружающим газом.

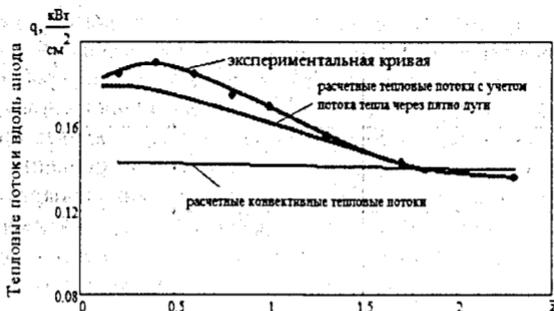


Рисунок 3 — Сравнение результатов расчета тепловых потоков вдоль анода с экспериментальными данными

$$d = 2 \text{ см}; \bar{a} = 20,5; I = 90 \text{ А}; G = 10 \frac{\text{г}}{\text{с}}; g_r = 0; g_a = 2 \frac{\text{г}}{\text{с}}; g_r = 3,6 \frac{\text{г}}{\text{с}}; \bar{z}_r = 7,5$$

На основании проведенных исследований установлено, что тепловые потоки в выходном электроде при развитом турбулентном течении можно с удовлетворительной точностью рассчитывать по формулам для теплообмена турбулентного потока газа со стенкой трубы с учетом тепловых потерь через анодное пятно дуги и теплоотдачи от участка дуги в анод.

Реализация развитого турбулентного потока плазмы позволяет интенсифицировать теплоотдачу от плазменного потока к стенке цилиндрического канала анода и нагреваемой детали.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кутателадзе, С.С. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьев. — М.: Энергия, 1972. — 342 с.
2. Жуков, М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Б.А. Урюков. — Новосибирск, Наука, 1975. — 198 с.
3. Аньшаков, А.С. Электродуговые генераторы с межэлектродными вставками : монография / А.С. Аньшаков, М.Ф. Жуков, И.М. Засыпкин. — Новосибирск: Наука, 1981. — 221 с.

УДК 669.2

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ X12M

*Бартош Д.В., Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Черноиван Н.В.*

Брестский государственный технический университет,

Брест, Беларусь

Высокохромистая сталь X12M обладает высокой износостойкостью и хорошо закаливается. Ее широко применяют для изготовления различных по форме инструментов сложной формы: вырубных, отрезных, чеканочных штампов повышенной точности, накатных роликов и др. Эти стали близки к быстрорежущим: по структуре после отжига относятся к ледебуритному классу, после нормализации — к мартенситному. Их высокая износостойкость обуславливается большим количеством карбидов  $(\text{CrFe})_7\text{C}_3$ .

При нагреве выше температур перлитного превращения (800...820°C) вторичные карбиды растворяются и аустенит насыщается хромом. После закалки карбиды сохраняются в структуре закаленной стали.

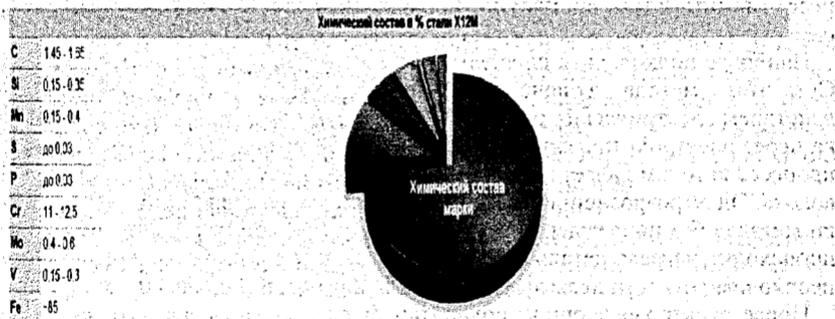


Рисунок 1 – Химический состав стали марки X12M

Структура и свойства высокохромистой стали в сильной степени зависит от температуры закалки, так как с ее повышением увеличивается растворимость карбидов, а также концентрация углерода и хрома в аустените. В связи с этим выбор оптимальной температуры закалки стали марки X12M существенно влияет на ее свойства после окончательной термической обработки.

Сталь X12M содержит большое количество карбидной фазы, что приводит к повышенной карбидной неоднородности, вызывающей снижение прочности и вязкости. Эта неоднородность сильно возрастает с увеличением размеров сечения, при этом резко снижаются механические свойства.

Металлография – направление в металловедении, классический метод исследования и контроля металлических материалов. Структуру металла изучают с помощью микроскопии, а выявляют ее путем изготовления образцов соответствующего среза, их шлифовки, полировки и травления.

Пробоподготовка является первым этапом при проведении исследования, являющегося совокупностью действий над изучаемым образцом, для перевода его в форму, наиболее подходящую для дальнейшего исследования.

Основная задача пробоподготовки – подготовка вещества, материалов, компонентов анализа для определенённого вида анализа.

Этапы металлографической подготовки образцов:

1. Изготовление заготовки;
2. Шлифовка;
3. Полировка;
4. Травление.

Затем наступает этап анализа полученного образца:

1. Анализ изображения (микроскопия) – для распознавания структуры материала.
2. Измерение твёрдости (твердометрия) – определение микротвёрдости металла.

Рассмотрим подробно каждый из этапов на примере пуансона выбивного пресса, изготовленного из закаленной стали марки X12M.

Сначала необходимо произвести вырезку интересующего нас фрагмента пуансона. Для этого можно использовать несколько способов. Чисто механически это можно сделать с помощью алмазного абразивного круга. При данном процессе мы автоматически получаем нарушение микроструктуры стали, вне зависимости от применяемых нами технологических мер.

Наиболее подходящим способом обработки был выбран электроэрозионный. Суть этого метода заключается в контролируемом разрушении металла под действием электрических разрядов между двумя электродами, то есть обработка через электролитическую эрозию в жидкой среде (в керосине). При данном процессе катодом является обрабатываемый пуансон, а анодом – латунная проволока. Электроэрозионный способ обработки прекрасно подходит для выборки металла без повреждения его микроструктуры, так как в ходе обработки не происходит нагрева детали и деформации ее структуры. К недостаткам метода необходимо отнести невысокую скорость обработки (порядка 0,7 мм в минуту).

После электроэрозионной обработки были получены два рабочих образца, пригодных для дальнейшего исследования.

В дальнейшем изготавливается форма, пригодная для последующих технологических операций. Изготавливается отливка в форме цилиндра диаметром 32 мм и высотой, равной 14 мм. В специальную форму помещают образцы стали и заливают компаундом с наполнителем из кварцевого песка, обладающим большей механической и термической стойкостью, чем эпоксидная смола.

После изготовления образца-формы она проходит этап шлифовки на абразивном круге и полировки специальной полировальной пастой на основе оксида хрома на нескольких полировальных кругах.

Травление шлифа производилась в растворе азотной и соляной кислот в глицерине (1:3:3).

После травления наступает этап исследования образца, заключающийся в исследовании структуры стали при помощи микроскопа. Это позволяет рассмотреть различные структурные составляющие стали.

Микротвердость – это твердость отдельных фаз и структурных составляющих, твердость внутри отдельных зёрен, тонкого поверхностного слоя (после химико-термической обработки). Микротвёрдость измеряется вдавливанием алмазной пирамидки под нагрузкой менее 2 Н в поверхность образца. Выбор участка для измерения микротвёрдости и определение размеров отпечатка производят под микроскопом, затем по специальным таблицам пересчитывают на так называемое число твёрдости – отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка. Прибор для определения микротвёрдости обеспечивает возможность выбора участка микроструктуры, где будет произведено вдавливание; благодаря малым размерам отпечатка можно измерять микротвёрдость отдельных фаз или даже отдельных зёрен.

После изготовления темплета были получены цифровые снимки микроструктуры стали, из которой изготовлен пуансон. На приведенном ниже снимке (рис. 2) можно видеть ярко выраженную карбидную неоднородность. Карбиды хрома имеют вытянутую вдоль рабочей кромки инструмента форму. Это увеличивает хрупкость поверхностного слоя стали, что в свою очередь снижает продолжительность работы инструмента. Рабочая кромка инструмента после много-



кратной пробивки отверстий в стальных пластинах толщиной 4 мм имеет достаточно неровную поверхность, что говорит о неравномерности её износа. Эти факты могут свидетельствовать о том, что режим закалки и плазменного упрочнения пуансона требуют тщательной оптимизации.

Рисунок 2 – Снимок микроструктуры приповерхностного слоя пуансона (x500)

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сорокин, В.Г. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин [и др.]; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение. – 1989. – 640 с.
2. Геллер, Ю.А. Материаловедение: методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштагт. – М.: Металлургия. – 1975. – 447 с.
3. Костиков, В.И. Плазменные покрытия / В. И. Костиков, Ю.А. Шестерин. – М.: Металлургия. – 1978. – 159 с.

УДК 621.785

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ВК8, Т15К6 И Т5К10

*Галилеев А.Г., Веремей П.В., Лапковский А.С.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

### 1. Введение

В настоящее время инструменты из твердых сплавов получили широкое распространение в промышленности. Применение многогранных неперетачиваемых быстросменных пластин из твердых сплавов при механической обработке материалов позволяет в несколько раз повысить производительность процесса за счет увеличения скоростей резания. Высокие режущие свойства твердого сплава обусловлены наличием в нём вольфрама. Однако обратной стороной высоких характеристик твердосплавного инструмента является дороговизна его составляющих, в частности того же вольфрама. Кроме того, недостатком твердых сплавов является их неудовлетворительная прочность и ударная вязкость в сравнении с быстрорежущими сталями [1].

Дальнейшее повышение скоростей резания и производительности обработки связано в первую очередь с совершенствованием свойств инструментальных материалов, подразумевающим в том числе и получение границ раздела «кар-

бид металла – связующее» с необходимыми прочностными и упругими характеристиками. Лазерная закалка импульсным и непрерывным излучением позволяет повысить уровень свойств материалов и создать сплавы с новым комплексом физико-механических свойств. Происходящие в процессе лазерной закалки структурно-фазовые превращения поверхностного слоя позволяют добиться повышения размерной стойкости инструмента в 2-3 раза. Особый интерес в данном вопросе представляет использование сканирующих систем управления лазером, с помощью которых возможно достижение более равномерного распределения свойств по сечению поверхностного слоя и, как следствие, повышение итоговой стойкости твердосплавного инструмента.

В данном исследовании проводилось изучение влияния лазерного упрочнения сканирующим излучением на структурно-фазовые превращения твердых сплавов, происходящие в поверхностном слое обрабатываемых пластин, а также исследовалось влияние режимов лазерной обработки на микротвердость поверхности.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1 Упрочняемые материалы и режимы обработки

Упрочняющей обработке подвергались пластины из твердых сплавов марок ВК8, Т15К6 и Т5К10. Данные марки сплавов содержат 6..10% Со-связки, 5 и 15% карбида титана TiC (для сплавов Т5К10 и Т15К6 соответственно), а также карбид вольфрама WC. Обработка велась при мощности лазерного пучка 800 Вт, частоте сканирования 220 двойных ходов в секунду и при скорости перемещения лазера, изменявшейся в диапазоне 300..900 мм/мин.

### 2.2 Исследование структурно-фазового состава

Были проведены исследования фазового и химического состава поверхностного слоя твердосплавных пластин, подвергнутых упрочняющей лазерной обработке, в ходе которых выяснялись следующие вопросы:

- 1) фазовый состав исходного и обработанного лазером материала пластины;
- 2) приблизительное соотношение количеств фаз.

Проведение съемок выполняли в строго идентичных условиях на дифрактометре ДРОН-3,0 при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении [2].

### 2.3 Исследование микротвердости

Основным физико-механическим свойством упрочненного слоя, определяющим его эксплуатационные характеристики, является микротвердость. Испытания ее производились при помощи микротвердомера ПМТ-3 по стандартной методике при величине статической нагрузки  $P=1,962 \text{ Н}$  (200 г).

Значение микротвердости определяется по формуле:

$$H_{\mu} = \frac{1854P \times 10^4}{d^2}, \text{ ГПа}, \quad (1)$$

где  $P$  – нагрузка, г;  $d$  – диагональ отпечатка, делений.

## 3. Результаты исследований

Результаты рентгенографических исследований пластин ВК8, Т15К6 и Т5К10, подвергнутых закалке сканирующим лазерным излучением, показыва-

ют, что с увеличением мощности лазерного луча количество  $W_2C$  и  $WC_{куб}$  возрастает, причем большему количеству  $Co$  в сплаве соответствует увеличение количества  $W_2C$  и уменьшение количества  $WC_{куб}$  (рисунки 1 и 2).

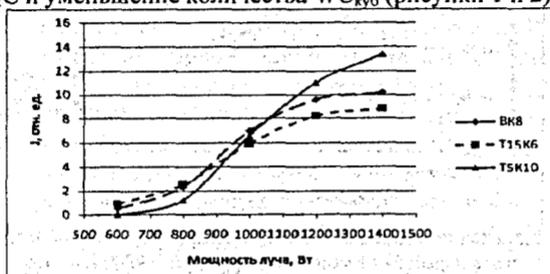


Рисунок 1 - Изменение содержания  $W_2C$  в поверхностном слое твердых сплавов в зависимости от мощности луча при  $V=800$  мм/мин.

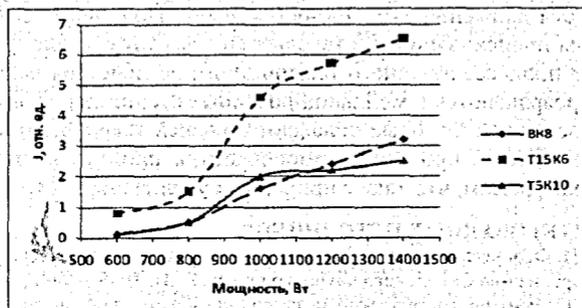


Рисунок 2 - Изменение содержания  $WC_{куб}$  в поверхностном слое твердых сплавов в зависимости от мощности луча при  $V=800$  мм/мин.

Представленные на графике результаты говорят о следующем. При воздействии лазерного сканирующего излучения с небольшой мощностью температура поверхности оказывается немногим ниже температуры плавления кобальта и значительно ниже температуры плавления карбидов вольфрама и титана. Вследствие того, что тепловое воздействие на поверхность носит кратковременный характер, появление  $W_2C$  и  $WC_{куб}$  носит эпизодический характер. Увеличение мощности лазерного пучка приводит к увеличению температуры на обрабатываемой поверхности до величин выше температуры плавления карбидов, вследствие чего начинается процесс растворения карбидных зерен в  $Co$  в связке. По окончании периода лазерного воздействия происходит быстрое охлаждение поверхности и часть исходного карбида  $WC$  выделяется из связки с образованием модификаций  $W_2C$  и  $WC_{куб}$ .

Согласно литературным данным, микротвердость  $H_v$  твердых сплавов марки BK8 составляет порядка 15 ГПа, а сплавов T15K6 и T5K10 – 13..14 ГПа. Проведенные исследования показали, что термическая обработка сканирующим лазерным излучением сплава T15K6 приводит в отдельных случаях к повышению микротвердости поверхности твердосплавных пластин в среднем в 1,5..1,8 раза (рисунок 2).

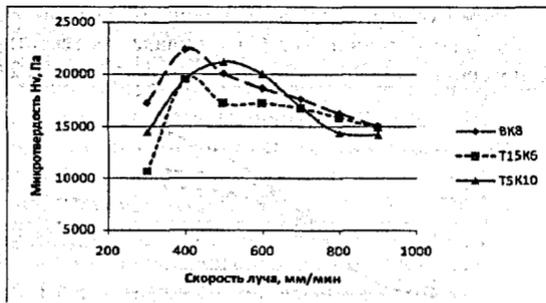


Рисунок 3 - Изменение содержания  $WC_{\text{кзб}}$  в поверхностном слое твердых сплавов в зависимости от мощности луча при  $V=800$  мм/мин.

ДюрOMETрические исследования сплавов, подвергнутых ЛТО с мощностью луча 800 Вт, показали, что имеет место скачок микротвердости на участке изменения скорости движения луча 400-600 мм/мин. Подобные изменения могут быть объяснены происходящими в твердых сплавах структурно-фазовыми превращениями. В процессе лазерного термического воздействия исходные карбиды частично превращаются в модифицированные структуры с измененной кристаллической решеткой, которые обладают большей твердостью по сравнению с  $\alpha$ -WC. Кроме того, в процессе термообработки происходит насыщение со связующего вольфрамом, что также приводит к увеличению твердости.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ярьско, С.И. Физические и технологические основы упрочнения твердых сплавов: монография. – Самара: изд-во Самарского научного центра РАН, 2006. – 244с.
2. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 256 с.

УДК 621.81

### ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

*Дашкевич В.Г.<sup>1</sup>, Пивоварчик А.А.<sup>2</sup>, Щербаков В.Г.<sup>1</sup>*

1) Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь;

2) Гродненский государственный Университет имени Янки Купалы,  
Гродно, Республика Беларусь.

Одним из перспективных направлений в разработке наплавочных материалов является использование процесса диффузионного легирования. Диффузионный слой, получаемый на поверхности материала, может влиять или даже регламентировать структуру и свойства наплавленного слоя. Работы по использованию диффузионно-легированного материала для получения наплавочного можно признать вполне успешными [1, 2]. Процессы, происходящие при оплавлении

диффузионно-легированных материалов, имеют ряд отличительных особенностей. Наиболее важное отличие — происходящее растворение диффузионного слоя, перемешивание и последующее структурообразование. В работе исследовался характер плавления диффузионно-легированных материалов в виде стальной проволоки при воздействии электрической дуги путем пропускания электрического тока через нее. На процесс плавления существенно влияет материал основы и состав диффузионного слоя. Исследование структурообразования при оплавлении углеродистой проволоки марки У7 диаметром 1,2 мм диффузионно-легированной бором или борсодержащими комплексами В-Сг, В-А1, В-Мп позволили качественно установить некоторые особенности плавления.

Столб дуги формируется от центральной части (бездиффузионной), такая схема обусловлена ее повышенной электропроводностью, в результате, возможны два крайних случая [3]:

- сформированный процессом химико-термической обработки диффузионный слой растворяется («рассасывается») по мере приближения теплового поля, направленного от столба дуги и капли, и легирует основной металл;

- слой отделяется от основного металла проволоки и обгорает.

Как правило, диффузионный слой не успевает полностью раствориться в расплаве капли или ванне, в результате чего формируется макрохимическая неоднородность наплавленного покрытия.

На растворение диффузионного слоя влияют режимы наплавки (главным образом сила тока и вылет электрода). От напряжения ( $U_0$ ) расплавление зависит слабо, можно лишь отметить, что при увеличении значений напряжения холостого хода от 25 до 30 В, процесс более устойчив, меньше вероятность возникновения обрывов. Наиболее активно влияют на растворение сила тока и длина вылета электродной проволоки. Это вполне закономерно, поскольку температура в вылете электрода есть функция изменения тока дуги, удельного электрического сопротивления, теплоемкости диффузионного слоя и основного металла. При большой мощности электрической дуги увеличивается средняя температура капли, происходит укрупнение ее размера, что способствует более эффективному растворению диффузионного слоя, но до определенного значения. Следствием увеличения мощности теплового потока из капли в электрод может стать процесс разрушения диффузионного слоя.

Эффективным параметром управления процессом растворения диффузионного слоя после характеристики мощности дуги является вылет электрода. При его увеличении область жидкофазного растворения «растягивается» по длине электрода, достигая значения 1 мм и более, что способствует более эффективному растворению диффузионного слоя, однако протекающее следом образование капли электродного металла проходит в худших окислительных условиях, что приводит не к снижению потерь, а к их увеличению, в основном бора, за счет активного флюсования электродной капли.

Скорость подачи электродной проволоки тоже влияет на процесс растворения диффузионного слоя, при больших ее значениях ( $V_n \geq 100$  м/ч) плавление основного металла проходит с опережающей скоростью, при этом диффузион-

ный слой или его часть выступает «козырьком» и отделяется (эффект «обгорания») за счет возникающих термических напряжений. Тем не менее, увеличение скорости способствует увеличению длительности процесса жидкофазного растворения на границе основной металл – диффузионный слой.

Таким образом, на «жестких» режимах, предполагающих большую силу тока ( $I_{св} \geq 200$  А), высокую скорость наплавки ( $V_n \geq 100$  м/ч) и небольшой вылет ( $h_{выл} \leq 15$  мм), процесс растворения проходит крайне медленно, растворение практически затормаживается, потери легирующих элементов большие. Например, для проволоки после бороалитирования характерным является присутствие очень узкой области жидкофазного растворения 0,1...0,2 мм, а также отделение от основного диффузионного слоя высокобористой фазы (FeB) за счет термических напряжений. При силе тока более 200 А и подаче электродной проволоки медленнее 50 м/ч проволока перегревается и плавится («течет»), а покрытие формируется с дефектами.

В ходе проведенных исследований установлены следующие режимы наплавки борсодержащей диффузионно-легированной проволоки  $\varnothing 1,2$  мм в нижнем пространственном положении, которые наиболее эффективно способствуют растворению диффузионного слоя:  $I_{св} = 120...150$  А,  $U_d = 28...32$  В,  $V_n = 60...80$  м/ч,  $h_{выл} = 30$  мм; расход защитного газа 12 л/мин. В общем случае при применении режимов ( $U_d$ ,  $I_{св}$ ) как для сплошных проволок процесс протекает с растворением диффузионного слоя, хотя и отмечается большими потерями за счет невысокой эффективности растворения. Полной гомогенизации расплава на «жестких» режимах не проходит. Диффузионный слой не перемешивается с основным металлом, а распределяется по поверхности капли или отделяется от стальной сердцевины и обгорает.

Отметим еще одну особенность плавления диффузионно-легированной борсодержащей проволоки, которая характеризует перенос электродного металла через дуговой промежуток. Известно, что увеличение поверхностного натяжения при прочих равных условиях способствует увеличению размеров капель, образующихся на торце проволоки. За счет горофильного действия бора перенос электродного металла при наплавке диффузионно-легированной проволоки, как правило, крупнокапельный.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Константинов, В.М. Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.М. Константинов; ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси». – Мн., 2008. – 46 с.
2. Стефанович, В.А. Исследование возможности получения наплавленных покрытий из борированной проволоки / В.А. Стефанович, С.В. Борисов, А.В. Стефанович // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сб. науч. тр., посвященный 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении» / Белорус. национ. техн. ун-т; под ред. Л.Г. Ворошнина. – Минск, 2004. – С. 56–62.
3. Константинов, В.М. Исследование структурообразования при получении и наплавке диффузионно-легированной стальной проволоки / В.М. Константинов, М.В. Семенченко, В.Г. Дашкевич // Сборник научных трудов «Металлургия». – Мн., 2008. – С. 260–272.

## ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ТЕЛ С СОГЛАСОВАННЫМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

*Мелешко И.Н., Пронкевич С.А.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Разработка методов решения контактных задач для тел с согласованными поверхностями остается актуальной проблемой, исследованию которой посвящено достаточно большое количество работ [2, 3]. Неприменимость теории Герца в связи с увеличением области контакта до масштаба порядка характерного размера контактирующих тел требует иного подхода к решению таких задач [1, 2, 3].

Пусть упругий цилиндр, длина которого не менее порядка диаметра и более, вложен в упругое тело с цилиндрической полостью, так что по нижней границе они находятся в контакте. Под действием приложенных нагрузок в контактирующих телах возникают деформации и напряжения, которые удовлетворяют уравнениям равновесия так, что в сечении, расположенном достаточно далеко от торцов цилиндра напряженно-деформированное состояние является плоским (рисунок 1).

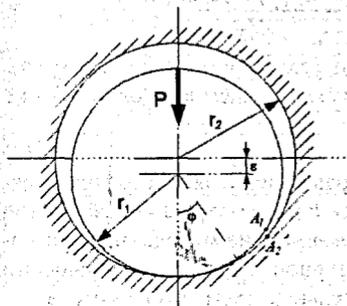


Рисунок 1 - Внутренний контакт областей с круговыми границами

В этом случае в области контакта выполняется соотношение:

$$u_{1r} + u_{2r} = \alpha \cos \varphi - \varepsilon(1 - \cos \varphi),$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – нормальные упругие перемещения точек цилиндра и полости,  $\alpha$  – сближение тел при сжатии,  $\varepsilon = r_2 - r_1$ . Сближение тел  $\alpha$  зависит от величины внешней нагрузки и механических свойств соприкасающихся поверхностей [1].

Задача, в итоге, сводится к решению интегро-дифференциального уравнения типа Прандтля:

$$\int_{-tg \varphi_0}^{tg \varphi_0} \frac{g'(t) dt}{t-x} + \frac{\chi_1 r_1 + \chi_2 r_2}{(\vartheta_1 r_1 + \vartheta_2 r_2)(1+x^2)} g(x) = -\frac{q\bar{x} + \gamma \arctg \bar{x}}{1+x^2}, \quad -tg \varphi_0 < x < tg \varphi_0 \quad (1)$$

$$\text{где } \vartheta_1 = \frac{\lambda_1 + 2\mu_1}{4\pi\mu_1(\lambda_1 + \mu_1)}, \quad \vartheta_2 = \frac{\lambda_2 + 2\mu_2}{4\pi\mu_2(\lambda_2 + \mu_2)}, \quad \chi_1 = \frac{1}{4(\lambda_1 + \mu_1)}, \quad \chi_2 = \frac{1}{4(\lambda_2 + \mu_2)}$$

параметры, зависящие от материалов контактирующих поверхностей,

$$\gamma = \frac{2\vartheta_2 r_2 q + r_2 - r_1}{2(\vartheta_1 r_1 + \vartheta_2 r_2)}, \quad \bar{x} = tg \varphi, \quad q = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} p(\varphi') d\varphi'$$

Искомое контактное давление определяется выражением:

$$p(\varphi) = \sec^2 \varphi g'(\operatorname{tg} \varphi) \quad (2)$$

Перепишем выражение (1) в виде:

$$\frac{g(x)}{B(x)} - \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{g'(t)}{t-x} dt = f(x), \quad -1 < x < 1, \quad (3)$$

$$\text{где } x = \frac{\bar{x}}{\operatorname{tg} \varphi_0}, \quad t = \frac{\tau}{\operatorname{tg} \varphi_0},$$

$$B(x) = \frac{(\vartheta_1 r_1 + \vartheta_2 r_2) \left( 1 + (x \cdot \operatorname{tg} \varphi_0)^2 \right)}{-\pi (\chi_1 r_1 + \chi_2 r_2)}, \quad f(x) = -\frac{1}{\pi} \frac{q(x \cdot \operatorname{tg} \varphi_0) + \gamma \operatorname{arctg}(x \cdot \operatorname{tg} \varphi_0)}{1 + (x \cdot \operatorname{tg} \varphi_0)^2}.$$

Будем считать, что  $B(x)$  и  $f(x)$  — удовлетворяют условию Гельдера на отрезке  $[-1, 1]$  и что функция  $B(x)$  нигде, за возможным исключением концов, в нуль не обращается, кроме того,

$$g(-1) = g(1) = 0 \quad (4)$$

Традиционным подходом решения данного уравнения является метод, предложенный И. Векуа или метод конечных разностей. Рассмотрим новый подход к приближенному решению уравнения (3), основанный на методе, предложенном И.Н. Мелешко [4]. Использование квадратурной формулы специального вида позволяет значительно упростить вычислительную схему этого метода.

Решение уравнения (3) можно представить в следующем виде:

$$g(x) = \sqrt{1-x^2} \sum_{-n}^n A_k(x) u_k \quad (5)$$

$$\text{где } A_k(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \left[ \left( x_k + \frac{h}{2} - x \right) H \left( x, x_k + \frac{h}{2} \right) - \left( x_k - \frac{h}{2} - x \right) H \left( x, x_k - \frac{h}{2} \right) \right] + \\ + \frac{1}{\pi} \left[ \arcsin \left( x_k + \frac{h}{2} \right) - \arcsin \left( x_k - \frac{h}{2} \right) \right].$$

$$H(x, t) = \ln \frac{1 - xt + \sqrt{(1-x^2)(1-t^2)}}{|t-x|}.$$

Используя (5), находим искомое давление (2).

В качестве примера решения было рассмотрено тело с отверстием единичного радиуса  $R=0.1$  м и цилиндр радиуса  $r=0.099$  м. Материалом для тела и для цилиндра является сталь со следующими физическими характеристиками:

модуль Юнга  $E=2 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\nu=0,3$ .

Расчет контактного давления производился в системе компьютерной алгебры Mathematica.

Вышеизложенное решение сравнивалось с численным решением в конечно-элементной системе ANSYS.

На рисунке 2 представлено распределение контактного давления  $p(\varphi)$ , полученное на основе решения И.Я. Штаермана с помощью вышеизложенного алгоритма и в системе ANSYS.

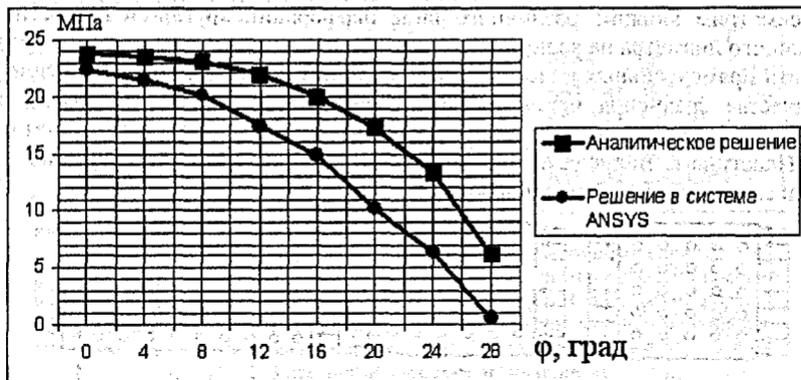


Рисунок 2 – Распределение давления  $p(\varphi)$  в области контакта, полученное на основе предложенного численно-аналитического решения и в системе ANSYS

Сравнение результатов, полученных на основе построения приближенного решения (1) и с использованием конечно-элементного моделирования, показывают, что минимальное расхождение давления составляет около 10% в зоне наибольшего сближения тел. Далее наблюдается расхождение результатов.

В то же время отметим, что использование систем компьютерной математики (Mathematica, Maple, MathCAD и др.) для решения такого рода задач значительно проще и не требует изучения таких громоздких систем, как ANSYS.

Моделирование данной задачи в системе ANSYS вызывает ряд затруднений, связанных с моделированием контактных пар контактирующих поверхностей, в частности контактной жесткости (Contact stiffness) и опций ее пересчета (update stiffness), необходимых для построения корректной конечно-элементной модели, учитывающей, например, выборку зазора при вхождении в контакт конечных элементов, изначально находящихся на определенном расстоянии друг от друга.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

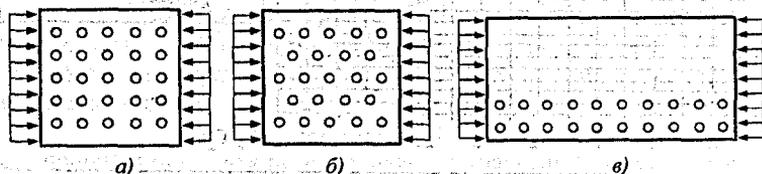
1. Штаерман, И.Я. Контактная задача теории упругости. – Л.: Гостехиздат, 1949. – 270 с.
2. Развитие теории контактных задач в СССР / Под ред. Л.А. Галина. – М.: Наука, 1976. – 493 с.
3. Кравчук, А.С. Механика контактного взаимодействия тел с круговыми границами / А.С. Кравчук, А.В. Чигарев. – Минск: Технопринт, 2000. – 196 с.
4. Мелешко, И.М. К приближенному решению одного сингулярного интегрально-дифференциального уравнения // Дифференц. уравнения. – 1989. – Т.25, № 5. – С. 888-897.

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРФОРАЦИИ НА ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИН

Пронкевич С.А.

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Рассмотрим влияние различного вида перфораций круглыми отверстиями различного диаметра на величину критической нагрузки и форму потери устойчивости прямоугольных пластин с соотношением сторон  $a/b=1,2,3$  (рисунок 1). В качестве сравнения использовались величины критической нагрузки для прямоугольной пластины без отверстий с соответствующим отношением сторон. Пластина выполнена из изотропного материала, свободно оперта по контуру и сжимается с противоположных сторон.



а) — «прямой» порядок перфорации (а), «шахматный» порядок перфорации (б), частично перфорированная пластина (в)

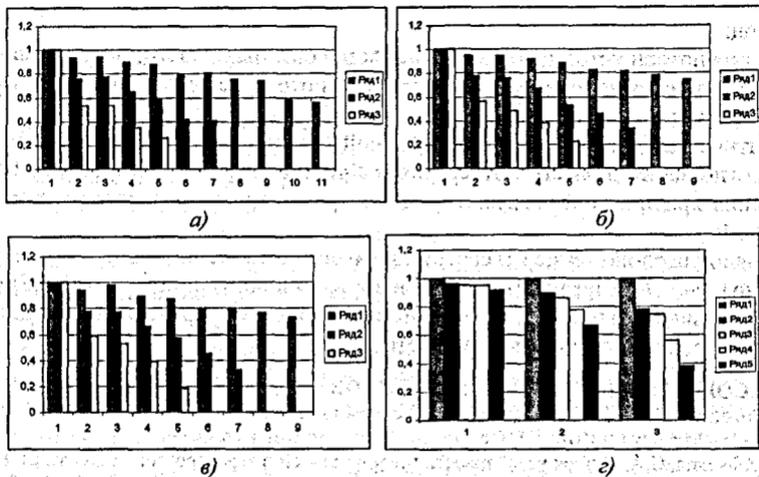
Рисунок 1 - Схема нагружения и расположения перфораций пластины при расчете потери устойчивости

При рассмотрении потери устойчивости квадратной пластины с соотношением диаметра отверстий  $d$  к ширине пластины  $b$  до  $d/b=0,1$  форма потери устойчивости не меняется и соответствует формам потери устойчивости пластины без отверстий.

На рисунке 2 показаны графики коэффициента критической нагрузки  $N^*$  - отношения величины критической нагрузки перфорированной пластины  $N^p$  к величине критической нагрузки пластины без отверстий  $N^0$  в зависимости от типа перфорации  $N^* = \frac{N^p}{N^0}$ . Из графиков видно, что квадратные пластины и прямоугольной пластины с соотношением сторон 1:2 и 1:3, перфорированные отверстиями в «шахматном» порядке, имеют величину критической нагрузки меньшую, чем перфорированные в «прямом». Формы потери устойчивости не изменяются.

При перфорировании прямоугольной пластины с соотношением сторон  $a/b=3$  отверстиями  $d/b=0,05$  формы потери устойчивости остаются теми же, что и для пластины без отверстий, но при перфорации отверстиями большого диаметра ( $d/b>0,1$ ) наблюдается изменение форм потери устойчивости (рисунок 3 а-г).

Как видно из рисунка 3, на форму потери устойчивости прямоугольной пластины, сжатой с торцов, влияет как порядок перфорации, так и ее диаметр.

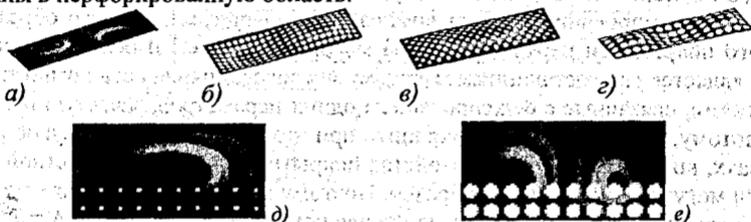


- 1 – пластина без отверстий; 2– 16 отверстий в «прямом» порядке;  
 3 – 13 отверстий в «шахматном порядке»; 4 – 25 отверстий в «прямом» порядке;  
 5 – 25 отверстие в «шахматном» порядке; 6 – 49 отверстий в «прямом» порядке;  
 7- 43 отверстия в «шахматном» порядке; 8- 64 отверстия в «прямом» порядке;  
 9 – 61 отверстие в «шахматном» порядке; 10 – 121 отверстие в «прямом» порядке;  
 11 – 113 отверстий в «шахматном» порядке

Рисунок 2– Формы потери устойчивости квадратной (а) и прямоугольной с соотношением сторон 1:2 (б), прямоугольной с соотношением сторон 1:3 (в), с частично перфорированной пластины (г)

Рассмотрим частично перфорированную прямоугольную пластину с соотношением сторон  $a/b=2$ , шарнирно опертую по контуру. Пластина сжимается с противоположных сторон распределенными нагрузками (рисунок 3 д, е).

При несимметричной перфорации отверстиями диаметром  $d/b=0,05$  формы потери устойчивости по сравнению с равномерно перфорированной пластиной не претерпевают каких-либо заметных изменений. При перфорации пластины отверстиями диаметром  $d/b=0,15$  наблюдается смещение максимумов прогибов пластины в перфорированную область.



- а) пластина без перфораций, б) перфорация  $d/b=0,1$ , прямой порядок 154 отверстий в) перфорация  $d/b=0,1$ , шахматный порядок 134 отверстия, г) перфорация  $d/b=0,15$  прямой 75 отверстий д) частичная перфорация  $d/b=0,05$ , е) частичная перфорация  $d/b=0,1$

Рисунок 3 - Формы потери устойчивости перфорированной пластины с соотношением сторон  $a/b=3$

Вывод:

- формы потери устойчивости для перфорированных пластин в подавляющем большинстве случаев совпадают с формами потери устойчивости для пластин без отверстий;

- критическая нагрузка перфорированной пластины уменьшается при увеличении отношения диаметра отверстия к ширине пластины ( $d/b$ ), зависимость изменения критической нагрузки от диаметра отверстия является практически линейной;

- порядок расположения отверстий при малом отношении диаметра к ширине пластины ( $d/b < 0,2$ ) незначительно влияет на величину критической нагрузки, но при большом количестве отверстий диаметром  $d/b = 0,3$  и выше форма потери устойчивости значительно изменяется.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Григолюк, Э.И. Перфорированные пластины и оболочки / Э.И. Григолюк, Л.А. Фильштинский. – М.: Наука, 1970. – 556 с.
2. Пронкевич, С.А. Потеря устойчивости прямоугольной перфорированной пластины, в зависимости от вида и размера перфораций // Аспирант и соискатель. – М., 2013. – № 5. – С. 121–123.
3. Лебедев, А.В. Устойчивость пластин, ослабленных отверстиями // Вестник СПбГУ, Сер. I. – 2009. – № 2. – С. 94–99.

УДК 620.17

### ОЦЕНКА И КОНТРОЛЬ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ С PVD/CVD ПОКРЫТИЕМ

*Константинов В.М., Ковальчук А.В.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Несмотря на существенный прогресс в области создания слоистых композиций с высоким уровнем свойств, существует проблема создания поверхностей с PVD/CVD покрытиями с заданным уровнем свойств. Это связывают с тем, что процесс формирования свойств композита с покрытием, а также образования самого покрытия и переходной зоны между покрытием и основным материалом, является многостадийным. Поэтому исследования свойств композитов покрытиями, связанные с фиксированием одних параметров, зачастую невозможны потому, что невозможно сохранить при этом неизменными другие [1]. А в случаях, когда это возможно, свойства покрытий и всей поверхностной композиции могут меняться скачкообразно. Поэтому актуальными являются исследования свойств систем покрытия на основе комплексного подхода. А так как нет известных технологических процессов, позволяющих реально получать вакуумные покрытия на металлических поверхностях с заданным или регулируемым уровнем свойств, то актуальным в условиях производства является контроль свойств поверхностей с покрытиями по основным параметрам в соответствии с условиями эксплуатации упрочняемых изделий.

Следует выделить наиболее важные для контроля свойства композитов с покрытиями:

- 1) нанотвердость и микротвердость;
- 2) модули упругости и жесткость;
- 3) износостойкость и коэффициент трения;
- 4) адгезионные свойства;
- 5) в ряде случаев коррозионная стойкость.

1. Прямое измерение твердости тонких покрытий с использованием обычных методов определения микротвердости является не совсем корректным. Это связано с тем, что в процессе нагружения пластической деформации помимо покрытия, подвергается подложка. Деформация подложки имеет место уже при глубине вдавливания индентора более чем на десятую часть толщины покрытия. Полученное таким образом значение твердости является результатом совместного вклада твердости покрытия и подложки. Для определения истинной твердости покрытия эти вклады принято разделять. Большинство моделей предлагают линейную зависимость измеренной твердости с твердостью подложки и покрытия. Различия используемых моделей состоят в определении коэффициента, входящего в линейное уравнение, который определяют как функцию от длины диагонали отпечатка, отношение упругих свойств покрытия и подложки, функцию от весовых коэффициентов, учитывающих объемы подложки и покрытия в зоне нагружения, как отношение пластической деформации в покрытии и подложке под индентором, функцию от энергии деформации покрытия и подложки и других [2].

Фактически, значения истинной твердости покрытия можно определить лишь при очень малых нагрузках (до 0,01 Н) и при глубине проникновения индентора до 10 % толщины покрытия, во всем остальном диапазоне нагрузок значения твердости будут зависеть от влияния подложки и, как правило, будут занижены, что показано на рисунке 1, где схематично представлены значения измеряемой твердости при различных глубинах внедрения индентора в сравнении с аналитической кривой твердости покрытия и выделена область влияния подложки.

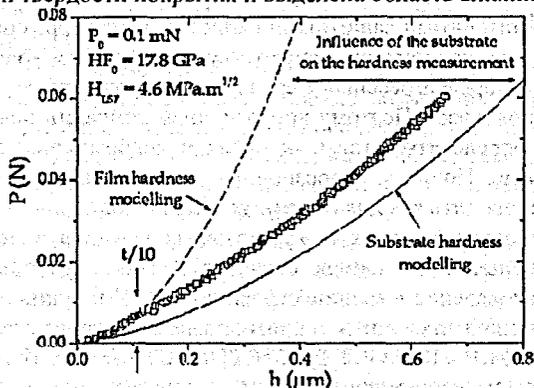


Рисунок 1 – Зависимость твердости покрытия от глубины внедрения индентора [2]

Довольно простым является способ определения истинной твердости слоистых композитов [3]. Согласно этому способу, для нахождения истинного значения микротвердости тонкого твердого покрытия необходимо замерить микротвердость с поверхности образца или на поперечном шлифе по размеру восстановленного отпечатка, оставленного алмазным индентором, на стандартном приборе типа ПМТ. Затем по соотношению найденных значений при нагрузках 0,1 и 0,2 Н определить значение истинной микротвердости с учетом вклада твердости подложки. Для согласования результатов с известными зарубежными микроиндентирование следует проводить по DIN EN ISO 3497, наноиндентирование – по DIN EN ISO 14577-1.

2. Значения модулей упругости и жесткости покрытий принято определять при обработке кривых нагружения-разгрузки, получаемых при наноиндентировании, по методике Оливера-Фарра [4].

3. Для определения износостойкости и коэффициента трения достаточным можно считать использование простого и эффективного метода определения износостойкости по величине линейного (или объемного) износа при трении в паре «диск – плоскость», разработанного в НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ под руководством Ф.Ф. Комарова. Способ предполагает оценку величины линейного износа при схеме сухого трения скольжения в паре «диск – плоскость».

4. Наиболее распространенными методами определения силы адгезии покрытий является метод отрыва покрытия от подложки и метод царапания (стандарт VDI-3198). Метод отрыва применяют, как правило, для толстых покрытий, а метод царапания для тонких. Авторами [5] предложен более простой быстрый метод качественной оценки адгезионных свойств покрытий при использовании нетрадиционного для этого способа – вытяжки сферической лунки. Применение этого метода для слоистых композитов позволяет производить сравнительную оценку силы адгезии по наличию трещин, отслоений и сколов при исследовании результатов вытяжки сферической лунки под микроскопом.

5. Тонкие керамические покрытия, несмотря на их химическую инертность, не обладают достаточными защитными свойствами от коррозии. Это обусловлено тем, что в них, как правило, присутствуют в большом количестве поры и дефекты, через которые агрессивная среда может проникать до границы раздела покрытия и подложки. Поэтому коррозионная стойкость поверхности с покрытием будет определяться главным образом коррозионной стойкостью основного материала. Поэтому коррозионные испытания композитов с покрытиями следует проводить как для объемных материалов.

Одним из наиболее быстрых и эффективных является способ проведения коррозионных испытаний в камере соляного тумана, осуществляемый на кафедре «Материаловедение в машиностроении» БНТУ на установке ASCOTT S 120 IP, позволяющей проводить коррозионные испытания в соответствии со стандартами ASTM B 117, ГОСТ Р 9.316-2006, СТБ ISO 2081-2009, ВУ и корректировать условия испытаний с учетом реальных условий эксплуатации изделий.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Наноструктурные покрытия / Под ред. А. Кавалеиро, Д. де Хоссена; перевод с англ. А.В. Хачояна; под ред. Р.А. Андриевского. – М.: Техносфера, 2011. – 752 с.
2. Sun, S. Finite element analysis of the critical ratio of coating thickness to indentation depth for coating property measurements by nano-indentation. / S. Sun; S. Zheng, T Bell // *Thin Solid Films*. – 1995. – Vol. 258. – № 1-2, – P. 198-204.
3. Чумиков, А.Б., Анифьев, В.А. Способ измерения микротвердости тонких металлических покрытий: патент RU № 2132546; G 01N 003/44; 27.06.1999.
4. Oliver, W. C. Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver; G. M. Pharr // *Journal of materials research*. – 1992. – Vol. 7. – №. 6. – P. 1564-1583.
5. Константинов, В. М. Повышение эксплуатационных свойств вакуумных наноструктурных покрытий упрочнением основы из конструкционной стали / В.М. Константинов, А.В. Ковальчук // НИРС 2012: сборник научных работ студентов Республики Беларусь. – Минск, 2013. – С. 150.

УДК 621.791

## ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

*Мешкова В.В., Кардаполова М.А., Луцко Н.И.*

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

Исследована микротвердость покрытий, полученных на стали методом лазерной обработки из порошков, способных к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС).

Введение. В современных условиях производства возникает необходимость в разработке новых материалов, обеспечивающих лучшие эксплуатационные характеристики деталей, узлов механизмов, инструмента и оснастки. Перспективными направлениями в области повышения долговечности работы и качества рабочих поверхностей являются упрочнение и нанесение покрытий на поверхности узлов и деталей.

Одним из эффективных методов улучшения качества поверхности является лазерная обработка, предоставляющая широкие возможности для получения покрытий, в том числе и с применением различных упрочняющих материалов. Этим методом могут создаваться покрытия из материалов, имеющих различные физико-механические свойства; покрытия, состоящие из металлических материалов, которые трудно получить другими методами.

Лазерная обработка является одним из способов вызова реакции горения при самовоспламеняющемся высокотемпературном синтезе (СВС). СВС это процесс распространения химической реакции, вызванной сильным тепловым воздействием на смеси материалов с образованием покрытий на поверхности, обладающих различными свойствами. Технология СВС применяется в различных отраслях промышленности: машиностроении, металлургии, химической промышленности, электротехнике и электронике, авиационной технике, строительстве.

В данной работе изучалось распределение микротвердости в направлении от поверхности покрытия к подложке, в покрытии, полученном лазерной обработкой СВС порошка, состоящего из смеси титана и бора. На образце из стали 3, подвергнутый предварительно дробеструйной обработке, нанесли покрытие в виде обмазки на водной основе с помощью CO<sub>2</sub>-лазера непрерывного действия типа «Комета». Шаг между наплавочными валиками составлял 4 мм, ширина наплавочного валика варьировалась в зависимости от скорости прохождения лазерного луча (для лунок №1,2,3,4,5 скорости 100, 200, 300, 400, 500 мм/мин соответственно). Установлено, что глубина лунки и ее ширина напрямую зависят от скорости: чем ниже скорость, тем глубже и шире лунка.

Далее из образцов изготавливались шлифы, с помощью которых и проводилось исследование микротвердости. Измерения проводились на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г с шагом 0,05 мм в направлении от поверхности покрытия к подложке. Результаты измерения микротвердости представлены на рисунке 1. На рисунке значения глубин 0 - 0,25 мм соответствуют лунке; 0,3 - 0,6 мм переходная зона и 0,6 - 1,0 мм - основной металл.

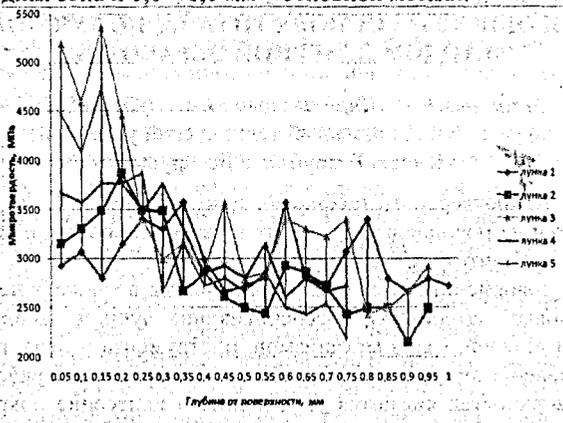


Рисунок 1 – Микротвердость покрытия из смеси порошков Ti+B

**Выводы.** При рассмотрении графиков можно сделать следующие выводы: для всех лунок наблюдается резкий рост микротвердости в диапазоне глубин 0 - 0,25 мм от 2800 до 5300 МПа, далее микротвердость неравномерно снижается по направлению к подложке, что позволяет сделать вывод об общем повышении микротвердости поверхностного слоя покрытия, полученного на стали методом лазерной обработки из порошков, способных к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС). Самые высокие значения микротвердости наблюдаются в третьей лунке, которая соответствует значению скорости лазерного луча 300 мм/мин.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Девойно, О.Г. Модифицирование поверхности покрытий с использованием лазерного нагрева / О.Г. Девойно, А.С. Калиниченко, М.А. Кардаполова. – Минск: БНТУ. – 2013. – 230 с.

## ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

*Батрак В.В., Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Черноиван Н.В.*

Брестский государственный технический университет,

Брест, Беларусь

### Введение

В результате обследования после продолжительной работы установки для измельчения древесины установлено, что основные ее элементы – ножи подвергаются сильному износу, механическим усилиям. Установлено, что ресурс непрерывной работы лимитируется сроком службы ножей, который составляет не более 2 месяцев, после чего производится ремонт установки. Для повышения продолжительности ресурса эксплуатации и сокращения времени простоя установки используются различные методы [1...3]. Проведенные эксперименты позволяют выделить из этих способов поверхностное упрочнение деталей при помощи высокоинтенсивных источников нагрева, применение которых позволяет реализовать процесс упрочнения деталей лишь на незначительную глубину.

Цель работы состоит в изучении механизма разрушения детали для переработки древесины и разработке соответствующих методов увеличения надежности и долговечности детали.

### 1. Изучение работоспособности установки

Обследование установки после длительной работы позволило установить, что основной причиной, определяющей ресурс ее непрерывной работы, является износ вращающихся с большой скоростью ножей. Эта деталь имеет пирамидальную форму с размерами основания 40x78 мм и высотой 30 мм, изготовленную из нержавеющей стали 20X14H2. Выбранная сталь является высоколегированной хромистой сталью. В системе Fe-Cr-C сталь 20X14H2 относится к полуперлитному классу.

Внешний вид детали приведен на рисунке 1. В процессе изготовления нож подвергался предварительной объемной закалке до величины твердости 42...48 HRC.

Визуальные обследования показали ряд типичных дефектов – поверхностная коррозия металла, затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки, разрушение полотна ножа, отламывание кусков в периферийной зоне.

При изучении характера износа отработавших свой ресурс ножей замечены характерные дефекты, которые также позволяют сделать выводы о характере и уровне действующих нагрузок.

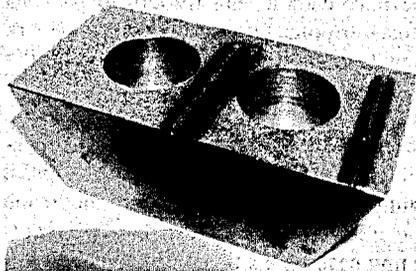


Рисунок 1 – Внешний вид детали

## 2. Методика исследований, их результаты и обсуждение

Как отмечено выше, объемная термозакалка не обеспечивает требуемой прочности ножа. Для повышения износостойкости в процессе трения и увеличения сопротивляемости пластическому и хрупкому разрушению в данной работе предлагается применить поверхностную термообработку детали (ПУ), как наиболее полно обеспечивающую оптимальное сочетание величины вязкости сердцевины детали с высокой поверхностной твердостью. Такое упрочнение реализуется путем локальной закалки при помощи быстро перемещающегося высокоинтенсивного высококонцентрированного источника тепла, а именно плазменной дуги, генерируемой плазмотроном постоянного тока мощностью 1,0...1,4 кВт.

Такое упрочнение деталей характеризуется рядом преимуществ:

- достаточно малой глубиной закалки (всего лишь в местах износа);
- при ПУ твердость поверхностного слоя заметно выше, чем при объемной закалке;
- отсутствие термических деформаций изготавливаемой детали благодаря локальности и кратковременности взаимодействия плазмы с поверхностью металла.

Установка состоит из плазмотрона постоянного тока, силового источника питания дуги, высокочастотного устройства поджига дуги, системы газоснабжения плазмотрона аргоном и азотом и системы водоохлаждения плазмотрона. Для перемещения плазмотрона с заданной скоростью создано специальное механическое устройство, реализующее движение ножа относительно плазмотрона. Силовой источник обеспечивает горение дуги при напряжениях 14...35В и токах 6...32А.

Плазменная закалка производилась с использованием в качестве плазмообразующего газа аргона, причем в плазмотроне применено обжимающее дугу солено с диаметром отверстия 1,2 мм. Скорость перемещения плазмотрона варьировалась от 4 до 27 мм/с.

Микростроение материала определялось при помощи оптического металлографического прибора типа НЕОРНОТ-21 при увеличении закаленного участка в диапазоне 50...1600 раз.

Процесс ПУ осуществлялся на экспериментальных образцах по описанным выше методикам. Термообработка плазменной струей выполнялась, изменяя ступенчато ток дуги плазмотрона.

Исследованы микротвердость поверхностного слоя в зависимости от расхода аргона, тока дуги, скорости перемещения плазмотрона. Определены зависимости микротвердости стали от скорости движения плазменной дуги по глубине поверхностного слоя. Типичные зависимости микротвердости вдоль дорожки при различных скоростях движения плазмотрона представлены на рис. 2.

Как показали исследования, значительное влияние на формирование структуры материала поверхностного слоя и микроструктуру оказывает также среда, в которой горит дуга. В стали, обработанной плазменной струей в защитной среде аргона (однократная обработка), не наблюдаются значительных качественных изменений в структуре материала при различных параметрах процесса.

### Изменение твердости по длине образца

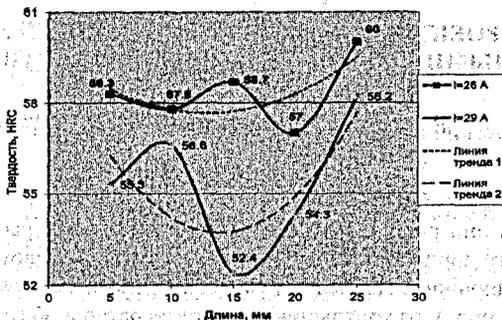


Рисунок 2 – Характер распределения микротвердости упрочненного слоя вдоль дорожки при различных скоростях движения дуги

Анализируя результаты рентгеноструктурных исследований, установили, что при воздействии плазменной струи в защитной среде азота в фазовом составе стали образуются карбиды и нитриды железа – гексагональная фаза типа  $\epsilon$ , что объясняется диффузионным насыщением азотом и углеродом исходного материала и происходящими химическими процессами.

Экспериментально подтверждена возможность закалки при наложении соседних дорожек друг на друга с расстояниями между их осями, равном 0,4 мм.

### Заключение

Проведено обследование работоспособности установки для переработки древесины. Установлено, что ресурс непрерывной работы установки лимитируется сроком эксплуатации ножей, который не превышал 2 месяца.

В процессе эксплуатации происходит поверхностная коррозия металла, затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки. Исследования показали, что такой характер износа ножей связан с их объемной термозакалкой.

Предложено для упрочнения применять плазменную поверхностную закалку при помощи сжатой движущейся плазменной дуги, генерируемой плазмотроном постоянного тока.

Проведены исследования структуры поверхностного закаленного слоя, его фазовый состав, микротвердость поверхностного слоя ножа в зависимости от параметров плазменной дуги: тока дуги, скорости перемещения плазмотрона, величины расходов плазмообразующего и защитного газов (аргона и азота).

В результате проведенных экспериментов экспериментально определены оптимальные параметры плазменного упрочнения.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиридонов, Н.В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н.В. Спиридонов, О.С. Кобяков, И.Л. Куприянов. – Мн.: Вышэйшая школа. – 1988. – 158 с.
2. Рыкалин, Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. справочник / Н.Н. Рыкалин, А.Л. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора – М.: Машиностроение, 1985. – 485 с.
3. Кундас, С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография. – Мн.: Бестпринт, 2005. – 313 с.

## РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЛОИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ЗАДАНЫМИ ТЕПЛОПРОВОДНЫМИ СВОЙСТВАМИ.

Али М. Абе́д Аль-Зобайде

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

**Введение.** Работоспособность приборов зачастую зависит от температурного режима, в котором они работают. В статье рассматривается расчет теплопроводности серверного ящика (рисунк 1), состоящего из трех слоев – двух несущих и теплоизоляционного. Данная задача сводится к прямой задаче теплообмена и, соответственно, к рассмотрению поля температур в области, состоящей из отдельных однородных слоев при различных граничных условиях.

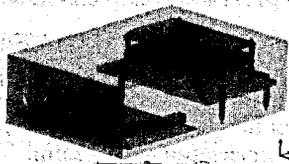


Рисунок 1 – Модель серверного ящика

Решение прямой задачи получается путем решения дифференциального уравнения теплопроводности, при заданных коэффициентах теплопроводности  $\alpha$  [1]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

Для получения аналитического решения уравнения (1) необходимо задание следующих краевых (граничных) условий: а) начальное распределение температуры в теле и б) температура на наружной поверхности.

В результате решения дифференциального уравнения (1) должна быть найдена такая функция, которая одновременно удовлетворяла бы этому уравнению и краевым условиям. Если решение уравнения (1) производится с помощью рядов Фурье, то его можно представить в виде:

$$T = bx + c + \sum_{n=1}^{\infty} A_n (\cos m_n x + p_n \sin m_n x) e^{-am_n^2 t}, \quad (2)$$

где  $b$  и  $c$  определяются из условий стационарности режима (при  $t \rightarrow \infty$ );  $p_n$  и  $m_n$  – из граничных и  $A_n$  – из начальных (при  $t=0$ ) условий.

Здесь предполагается, что задача одномерная.

Пусть толщина неограниченного плоского слоя составляет  $2\delta$  ( $l = \delta$ ). Если за начало отсчета температуры окружающей среды принять  $T_f$  и избыточную температуру слоя обозначить буквой  $\theta = T - T_w$ , то дифференциальное уравнение (1)

принимает вид: 
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}.$$

Граничные условия: при  $x = \pm \delta$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \pm \frac{\alpha \theta}{\lambda_{cm}}$$

И начальное условие: при  $t = 0$

$$\theta = \theta^0$$

Для стационарной задачи уравнение (1) примет вид:

$$\alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = 0. \quad (3)$$

Рассмотрим случай стационарного распределения тепла в трехслойном однородном теле. Для этого выделим один слой.

Для каждого слоя задана толщина  $\delta$  (рисунок 2). Коэффициент теплопроводности материала слоя постоянен и равен  $\lambda$ . Считается, что на наружных поверхностях температуры постоянны и равны  $T_1$  и  $T_2$ . Температура изменяется только в направлении оси  $x$ , перпендикулярной плоскости стенки.

Согласно закону Фурье количество переданного тепла пропорционально падению температуры, времени и площади сечения. При отнесении количества переданного тепла к единице площади и единице времени закономерность имеет вид [1]:

$$q = -\lambda \text{grad } T. \quad (4)$$

Для случая передачи тепла через однородную стенку закон Фурье (4) примет вид:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}. \quad (5)$$

Интегрируя уравнение (5), получаем:

$$T = -\frac{q}{\lambda} x + C. \quad (6)$$

Уравнение (6) можно получить, интегрируя уравнение (4). Постоянная интегрирования  $C$  определяется из граничных условий: при  $x=0$ ;  $T=T_1$ . Подставляя эти значения в уравнение (3), получим, что  $C=T_1$ .

При  $x=\delta$ ,  $T=T_2$ , следовательно

$$T_2 = -\frac{q}{\lambda} \delta + T_1. \quad (7)$$

Из уравнения (7) можно определить величину теплового потока  $q$ :

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) = \frac{\lambda}{\delta} \Delta T. \quad (8)$$

Подставляя значения из формул (7) и (8) в уравнение (6), получим уравнения температурной кривой:

$$T_x = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta} x. \quad (9)$$

Из уравнения (6) видно, что при постоянном значении коэффициента теплопроводности закон изменения температуры описывается линейным законом. Графиком изменения температуры является прямая.

При решении температурной задачи для стенки, состоящей из нескольких однородных слоев с различными свойствами (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость), необходимо учитывать условия на границах областей:

по закону сохранения энергии количество тепла, отводимое с единицы поверхности одной подобласти вследствие теплоотдачи, должно равняться теплу,

подводимому к единице поверхности второй подобласти вследствие теплопроводности из внутренних объемов тела, т.е. тепловой поток должен быть постоянен и для всех слоев одинаков. Т.о. для каждого слоя имеет место

$$\lambda_i \frac{dT_i(x)}{\delta_i dx} = \lambda_{i+1} \frac{dT_{i+1}(x)}{\delta_{i+1} dx}, \quad (10)$$

где  $\lambda_i, \lambda_{i+1}$  – коэффициенты теплопроводности в  $i$  и  $i+1$  области.  $\delta_i, \delta_{i+1}$  – толщина  $i$  и  $i+1$  области. Предполагается, что границы областей плотно прилегают друг к другу так что соприкасающиеся поверхности имеют общую температуру:  $T(x-0) = T(x+0)$  [2].

Рассмотрим трехслойную систему: два несущих силовых слоя, теплопроводность которых составляет 0,52 Вт/(м·°С). Теплопроводность промежуточного изоляционного слоя составляет 0,05 Вт/(м·°С). Толщина стенок составляет 0,5 мм. На поверхностях стены заданы следующие краевые условия: температура на одной из границ составляет 0 °С на другой - 18 °С (внутренняя температура).

Требуется определить зависимость изменения температуры от толщины стенки. Для первого слоя коэффициент теплопроводности составляет  $\lambda_1=0,52$  Вт/(м С), толщина  $\delta_1=0,2$  мм; для второго слоя  $\lambda_2=0,05$  Вт/(м С),  $\delta_2=0,1$  мм; для третьего слоя  $\lambda_3=0,52$  Вт/(м С),  $\delta_3=0,2$  мм.

Интегрирование уравнения (3) для каждого слоя дает следующие уравнения:

$$\begin{aligned} T_1(x) &= \frac{C_1}{\lambda_1} x + C_2 \quad 0 \leq x \leq \delta_1, \\ T_2(x) &= \frac{C_3}{\lambda_2} x + C_4 \quad \delta_1 < x \leq \delta_2, \\ T_3(x) &= \frac{C_5}{\lambda_3} x + C_6 \quad \delta_2 < x \leq \delta_3, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $C_1, \dots, C_6$  – постоянные интегрирования.

На стенках между слоями должны выполняться условия равенства теплового потока согласно уравнению (10):

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{dT}{\delta_1 dx} &= \lambda_2 \frac{dT}{\delta_2 dx}, \\ \lambda_2 \frac{dT}{\delta_2 dx} &= \lambda_3 \frac{dT}{\delta_3 dx}. \end{aligned} \quad (12)$$

Решая систему алгебраических уравнений (11)-(12), с учетом граничных условий

$$\begin{aligned} x=0, \quad T &= T_1 \\ x=\delta_4, \quad T &= T_4 \end{aligned}$$

найдем коэффициенты интегрирования  $C_i$  в законах распределения температур и построим график:

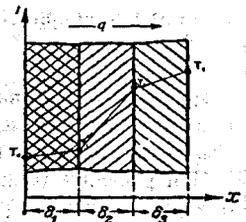


Рисунок 2 – График изменения температуры в стенке.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
2. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе / Москва: Атомиздат, 1979. – 416 с.

## ВЫБОР МОДЕЛИ СЕРВЕРА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СЕРВЕРНОМ ЯЩИКЕ

*Али М. Абед Аль-Зобайде*

Белорусский национальный технический университет,

Минск, Республика Беларусь

Предметом исследования является механико-электронное устройство (сервер), состоящее из ящика (корпус) и элементов, содержащих микросхемы. Данное устройство предназначено для сбора информации с пьезодатчиков и входит в состав комплекса мониторинга сооружений типа транспортных мостов.

Важную роль в эксплуатации приборов играет поддержание рабочего температурного режима внутри корпуса при разлной температуре внешней среды. При его проектировании необходимо учитывать многие факторы, такие как неоднородное распределение температуры внутри и вне корпуса, распределение потоков воздуха при охлаждении и т.д., и здесь неоценимую помощь оказывает конечно-элементное моделирование в системе ANSYS CFX.

ANSYS CFX – мощный инструмент для оптимизации процесса разработки и технологической подготовки в области вычислительной динамики жидкостей и газов [1].

Модуль ANSYS CFX полностью интегрирован в расчетную среду ANSYS Workbench - платформу, объединяющую все инструменты инженерного моделирования компании ANSYS. Адаптивная архитектура позволяет выполнять любые действия от стандартного анализа течения жидкости или газа до обработки сложных взаимодействующих систем.

Используемый язык программирования дает возможность задать описание проблемы в числовом виде, как в случае со сложными граничными условиями, авторскими моделями материалов или дополнительными уравнениями переноса. Адаптивная архитектура CFX-Pre также позволяет пользователю создавать собственные панели графического пользовательского интерфейса, чтобы стандартизировать ввод для выбранных приложений.

Сердцем модуля ANSYS CFX является алгебраический многосеточный сопряженный решатель, использующий технологию Coupled Algebraic Multigrid, являющуюся ключом к получению точных результатов в короткие сроки. Параметры решателя, граничные условия могут быть скорректированы во время выполнения расчета, при этом нет необходимости останавливать решатель. Решатель ANSYS CFX использует схему дискретизации второго порядка по умолчанию, обеспечивая получение максимально точных результатов.

Рассмотрим анализ распределения температур в зависимости от налагаемых начальных и граничных условий и конструкции корпусов. Трехмерные геометрические модели объектов исследования показаны на рисунке 1.

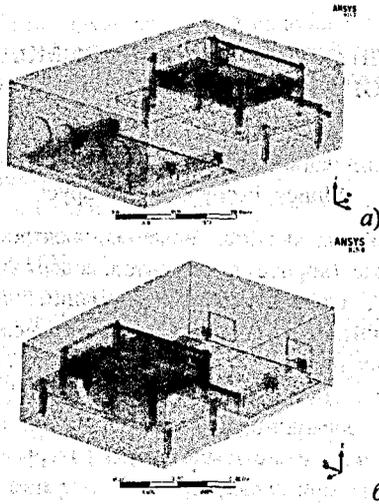


Рисунок 1 – Трехмерная геометрическая модель первого (а) и второго (б) вариантов корпуса

Первая модель имеет 4 технологических отверстия со стороны нагревательных элементов, устройство принудительной вентиляции отсутствует.

Вторая модель имеет два воздухозаборника со стороны нагревательных элементов и кулер для принудительной вентиляции.

В случае первой конструкции распространение температурного поля происходит посредством конвективного переноса, причем на стенках выполняется условие прилипания. В центральной части корпус нагревается за счет постоянных источников тепла. Отвод тепла осуществляется через отверстия в торце корпуса.

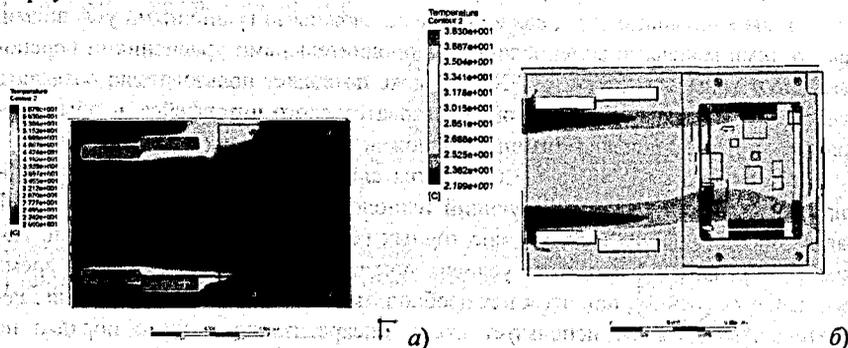


Рисунок 2 – Поле распределения температур в горизонтальной плоскости в первом (а) и во втором (б) варианте корпуса

На рисунке 2 показано распределение температуры в горизонтальном сечении придонного слоя воздуха. Из рисунка видно, что в первой модели имеется

хорошо выраженный эффект граничного слоя, когда ширина температурного граничного слоя соответствует ширине конвекционного граничного слоя. Это особенно хорошо видно в области экранирования одного нагревателя другим и в хвостах обтекания элементов сервера.

Для второго варианта корпуса видно, что изменение температуры происходит в элементах нагрева, ближний к вентилятору элемент имеет меньшую температуру, чем следующий за ним по направлению течения. Температурное поле имеет структуру линий тока воздуха, что сильно отличается от пассивной конвекции.

На рисунке 3 показано трехмерное распределение температуры в серверном ящике. Очевидно, что распределение температуры гораздо сложнее, чем в плоском случае.

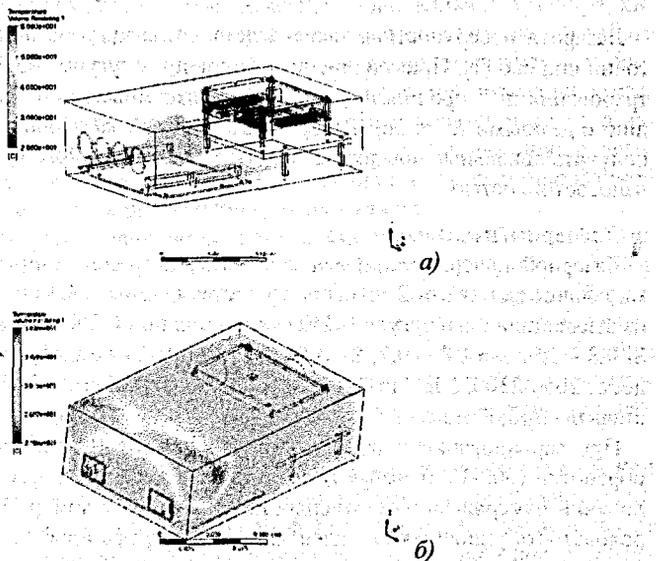


Рисунок 3 – Трехмерное распределение температур в обоих вариантах серверного ящика

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что в первом случае, при участии пассивного конвективного переноса элементы нагреваются практически до  $+60$  С. Во втором случае принудительной конвекции вентилятор обеспечивает хороший теплоотвод за счет ламинарно-турбулентного течения – температура не превышает  $37$  С области нагреваемых элементов. Исходя из этого, второй вариант является более предпочтительным для охлаждения элементов сервера, хотя, как было сказано выше, вибрация ведет к ускоренному износу элементов сервера, снижению надежности и долговечности.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. CFX: Computational Fluid Dynamics, Ansys, HVAC. International Book Market Service Limited, 2012. – 52 p.

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ НА МИКРОГЕОМЕТРИЮ ЗАКАЛЕННЫХ СЛОЁВ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ВЧ50

Веремей П.В.<sup>1</sup>, Кукин С.Ф.<sup>2</sup>, Девойно О.Г.<sup>1</sup>

1) Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь;

2) Минский тракторный завод,  
Минск, Республика Беларусь

Лазерная поверхностная закалка деталей из чугунов распространена достаточно широко [1]. Применение высокопрочных чугунов обусловлено высокими требованиями к прочности деталей, а также снижением стоимости по сравнению с деталями из стали. Лазерная закалка высокопрочного чугуна позволяет получать локальные поверхностные участки отбелённого чугуна с повышенной износостойкостью.

### Экспериментальная часть.

Лазерной поверхностной закалке (лазер оптоволоконный итербиевый, номинальная мощность 2 кВт, производства фирмы IPG) подвергалась заготовка из высокопрочного чугуна ВЧ50 (химсостав по ГОСТ 7293-85 (в %): С 2,7 – 3,7; Si 0,8 – 2,9; Mn 0,3 – 0,7; S до 0,02; P до 0,1; Cr до 0,15), исходная микротвёрдость 2050-2300МПа. Исходная шероховатость образца Ø60, длиной 200 мм составляла Ra0,63 мкм.

При варьировании подводимой мощности (от 1000 до 1600 Вт) и скорости обработки (300-1000 мм/мин) получили 15 режимов обработки. В ходе исследований измерялась микротвёрдость на микротвердомере ПМТ-3, а также шероховатость упрочнённого слоя на профилографе-профилометре ПРОФИ-130) по параметру «среднеквадратичное отклонение» по 10 точкам (Ra) по ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики».

В результате исследований выявлено, что наибольшая микротвёрдость (4800-5200 Мпа) в сочетании с глубиной закалки (0,1-0,2 мм) достигается при режимах с микрооплавлением поверхностного слоя, в то время как режимы с оплавлением поверхности заметно ухудшают исходную микрогеометрию (до Ra12,5 мкм). Зависимость шероховатости от скорости обработки (как и шероховатости от подводимой мощности) носит экстремальный характер. Наилучшие результаты измерений шероховатости (Ra0,58 мкм) были достигнуты при скорости обработки V=900мм/мин и подводимой мощности равной 1300 Вт.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с.

## ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ДИФФУЗИОННОГО БОРСОДЕРЖАЩЕГО СЛОЯ НА ЕГО РАСТВОРЕНИЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Дашкевич В.Г.<sup>1</sup>, Пивоварчик А.А.<sup>2</sup>

- 1) Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь;
- 2) Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,  
Гродно, Республика Беларусь

На растворение диффузионного борсодержащего слоя влияют структура, химический и фазовый состав основного металла, а также толщина слоя. В работе исследовались особенности структуры и фазового состава диффузионного борсодержащего слоя на стальных образцах в виде углеродистой проволоки и растворение слоя при воздействии концентрированными потоками энергии, в частности, электрической дугой. На режимах обработки, не вызывающих отделение диффузионного слоя для бормарганцированной и борохромированной проволоки, отмечены следующие особенности растворения:

1. Процесс растворения начинается с низкобористой фазы (Fe, Me)<sub>2</sub>B, по причине более низкой температуры плавления и направления теплового потока. На границе раздела «диффузионный слой – основа» за счет растворения боридной оболочки с внутренней стороны слоя (со стороны ядра проволоки) образуется область легкоплавкой эвтектики. Происходит контактное эвтектическое плавление. Металл на этом участке находится некоторое время в таком состоянии, которое способствует протеканию активной диффузии легирующих элементов между твердой и жидкой фазами [1, 2].

2. Переходная зона, которая имеет форму «клина», расширяющегося при приближении к капле, обогащается включениями избыточных фаз в виде боридов (Fe, Me)<sub>2</sub>B правильной геометрической формы, которые, отделившись от диффузионного слоя, постепенно растворяются. В зоне «клина» после охлаждения микротвердость по сечению растет от 4300 до 8600 МПа, что свидетельствует о перераспределении легирующих элементов. Бор, постепенно растворяясь, способствует увеличению твердости в указанной области и образованию пересыщенного твердого раствора, который после охлаждения формирует закалочные структуры [3].

3. В непосредственной близости к капле область смыкается, образуя практически однородную структуру, это обусловлено формированием только жидкой фазы. Происходит перемешивание расплавленного электродного металла в капле (жидкофазная гомогенизация), прежде всего, за счет электромагнитных сил. Однако в связи со скоротечностью стадии, перемешивания полностью не происходит. Не растворившаяся часть диффузионного слоя, оплавленная, распределяется по поверхности капли.

В результате исследования процесса растворения диффузионного слоя для борохромированной и бормарганцированной проволоки установлено, что в за-

висимости от фазового состава и структуры образование жидкой фазы проходит с различной интенсивностью. По результатам анализа микроструктуры участков переходной зоны (зоны жидкофазного растворения) после охлаждения отмечены следующие особенности:

- при плавлении боромарганцированной проволоки область жидкофазного растворения при одних и тех же условиях больше, чем борохромированной проволоки;

- образование мелкодисперстных включений боридов в заэвтектической зоне характерно для боромарганцированной проволоки (рисунок 1, б), для борохромированной преимущественно идет эвтектическое превращение, к тому же наблюдается образование бороцементитной оторочки, которая, видимо, снижает скорость плавления диффузионного слоя (рисунок 1, а).

Таким образом, наиболее активно растворение протекает для боромарганцированной проволоки по причине наличия в структуре диффузионного слоя преимущественно фазы  $(Fe, Mn)_2B$  и пониженной температуры плавления.

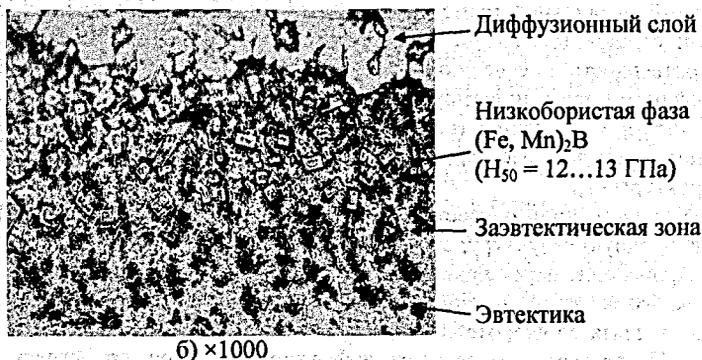
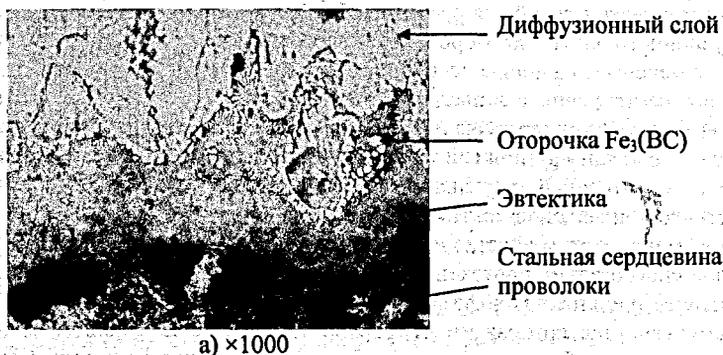


Рисунок 1 – Микроструктура границы «диффузионный слой - стальная сердцевина» в момент образования жидкой фазы при плавлении борохромированной (а) и боромарганцированной (б) стальной проволоки

Отметим, что согласно проведенной оценке скорости плавления проволоки, время существования жидкой фазы на границе раздела «диффузионный слой – стальная сердцевина» составляет примерно 0,02...0,05 с. Поэтому с учетом коэффициента диффузии атомов бора в жидкой фазе диффузионный путь атомов бора при свободном перемещении его в жидкости может составить 100...150 мкм. Следовательно, скорость, с которой протекает процесс плавления проволоки, достаточна для активного растворения диффузионного слоя.

В результате сформировано следующее представление о механизме процесса плавления борсодержащего диффузионно-легированного материала: существует стадия твердофазной диффузии элементов из диффузионного слоя в стальную сердцевину, затем образование жидкой фазы за счет контактного эвтектического плавления, ускоренное растворение диффузионного слоя и жидкофазная гомогенизация расплава.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бобылев, М.В. Перспективные экономно-легированные борсодержащие стали для производства высокопрочных сложных деталей / М.В. Бобылев, Е.Г. Королева, П.А. Штаников // *МитОМ*. – 2005. – № 5. – С. 51–55.
2. Лякишев, Н.П. Борсодержащие стали и сплавы / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер, С.И. Лапо. – М.: *Металлургия*, 1986. – 192 с.
3. Спиридонова, И.М. Структура и свойства железобористых сплавов / И.М. Спиридонова // *МитОМ*. – 1984. – № 2. – С. 55–57.

УДК 621.794.61:539.23

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКЕ

*Онысько С.Р.<sup>1</sup>, Хвисевич В.М.<sup>1</sup>, Чекан Н.М.<sup>2</sup>, Акула И.П.<sup>2</sup>*

1) Брестский государственный технический университет,

Брест, Республика Беларусь;

2) Физико-технический институт НАН Беларуси,

Минск, Республика Беларусь

Для осаждения покрытий ZrCN-DLC использовалась вакуумная установка УВНИПА-1-001, оснащенная катодно-дуговыми источниками плазмы, а также ионным источником. Откачка вакуумной камеры производилась до остаточного давления  $\sim 4,5 \cdot 10^{-3}$  Па. Непосредственно перед осаждением покрытий проводилась ионная очистка подложек путем бомбардировки их поверхности ионами аргона с энергией до 2 кэВ в течение 30 минут. Для нанесения покрытий использовался стационарный дуговой источник плазмы с катодом из Zr (99,9%). Толщина сформированных покрытий составляла около 2-3 мкм. Варьируемым параметром выступало давление реакционного углеводородного газа ( $C_2H_2$ ).

Для исследования фазового состава покрытий использовалась рентгеновская дифракция (дифрактометр Дрон-3), длина волны рентгеновского излучения 0,15405 нм ( $K\alpha_1$  излучение меди). Элементный состав и типы химических связей композиционных покрытий ZrCN-DLC определялись с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на приборе ЭС-2401 с длиной волны рентгеновского излучения 0,995 нм ( $MgK\alpha$ , 1253,6 эВ). Твер-

дость покрытий определялась методом индентирования на микротвердомере ПМТ-3, оснащённом алмазной пирамидой Кнупа, при нагрузке 0,5 Н. Исследования коэффициента трения сформированных нанокompозитов проводились на трибологическом стенде, работающем по схеме «палец-диск». В качестве контр-тела использовался шарик Ø 5,15 мм из стали ШХ15 при нагрузке 1 Н. Для подложек из инструментальной стали Х12М герцианское давление составило 705 МПа.

На рисунке 1 приведена рентгенограмма для образца покрытия ZrCN-DLC, полученного при частоте 1 Гц следования разрядных импульсов источника углеродной плазмы. На рентгенограмме присутствуют характерные для нитридных и карбидных фаз циркония рефлексы от плоскостей (111), (200), (220), (222) и (311), а также ряд рефлексов от основы (алюминий). Для всех исследованных образцов наблюдается наиболее высокая интенсивность рефлексов (111) и значительное уширение дифракционных линий. Высокая интенсивность указанного рефлекса свидетельствует о предпочтительном расположении кристаллитов, при котором плоскости (111) параллельны поверхности подложки. Ориентирующее влияние подложки объясняется большой величиной межфазной энергии для плотноупакованных плоскостей (111) ГЦК структуры нитридов и карбидов циркония [1]. Рефлексы (200), (220), (222) и (311) имеют значительно меньшую интенсивность.

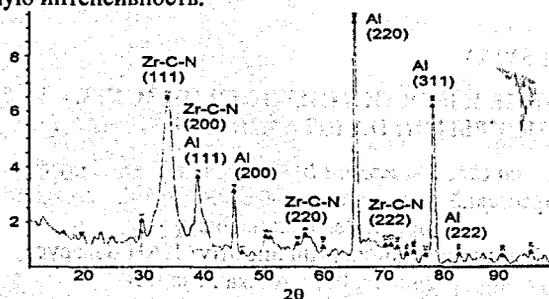


Рисунок 1 – Рентгенограмма покрытия ZrCN-DLC

Расчет межплоскостных расстояний  $d_{hkl}$  в полученных покрытиях по положениям дифракционных максимумов показал, что значения  $d_{hkl}$  для покрытий являются промежуточными по отношению к нитридной и карбидной фазе (таблица 1). Это дает основание предположить, что покрытия представляют собой не конгломерат фаз нитридов и карбидов, а являются монофазными.

Таблица 1 – Значения межплоскостных расстояний в пленках

Плоскости	d, Å (стехиометр. состав)		d, Å (эксперимент)		
	ZrN	ZrC d, Å	Процесс 1	Процесс 2	Процесс 3
(111)	2,64	2,71	2,66	2,68	2,66
(200)	2,29	2,35	2,33	2,34	2,34
(220)	1,62	1,66	1,66	1,63	1,64
(222)	1,32	1,36	1,34	1,33	1,30
(311)	1,38	1,42	1,43	1,39	1,41

В работе [2] в качестве фазы, реализующейся в тонких пленках системы Zr-C-N, приводится  $\delta$ -фаза карбонитрида циркония  $Zr(C_xN_{1-x})_{1-y}$  с ГЦК структурой, постоянная решетки которой зависит от соотношения компонент N и C, при этом ее величина находится между 0,458 и 0,470 нм.

Сравнение межплоскостных расстояний, рассчитанных по четко выраженным рефлексам (111), для покрытий показывает, что при малом количестве поступающего на основу алмазоподобного углеродного материала параметры кристаллической решетки  $\delta$ -фазы карбонитрида циркония, как и следовало ожидать, ближе к соответствующим параметрам фазы ZrN. При увеличении частоты разрядных импульсов также происходит увеличение  $d(111)$ , как это видно для покрытий из процесса 2. Однако эта тенденция не прослеживается при дальнейшем росте количества углерода в покрытии. Характеристики межплоскостных расстояний образцов для режимов 1 и 3 мало чем отличаются. При избытке поступающего на подложку углерода, кроме образования карбонитрида циркония, происходит формирование метастабильной фазы алмазоподобного углерода (АПУ). Конкурирующий процесс роста межкристаллитных включений АПУ материала становится доминирующим, что вызывает снижение содержания углерода в  $\delta$ -фазе карбонитрида циркония и приводит к уменьшению постоянной решетки для этой фазы.

Одним из наиболее доступных и распространенных способов нахождения размеров кристаллитов в поликристаллических пленках является анализ уширения рентгеновских дифракционных пиков. Размер кристаллитов для всех образцов находится в пределах 2,9-4,0 нм. При этом прослеживается тенденция уменьшения размера зерна кристаллитов с увеличением числа импульсов углеродного источника плазмы, т.е. с увеличением содержания углерода в покрытии.

Особенности формирования химических связей между элементами покрытия были исследованы с использованием метода РФЭС.

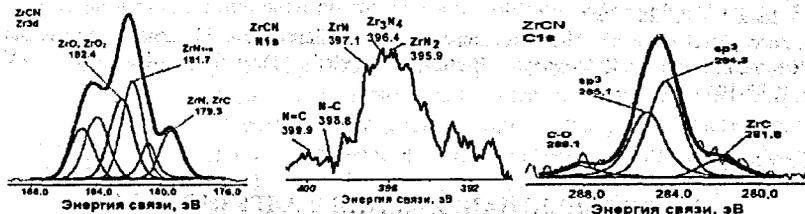


Рисунок 2 – РФЭС спектр Zr3d, спектр N1s, спектр C1s

Спектр 3d электронов циркония (рисунок 2) включает в себя несколько дублетов, соответствующих связям циркония с азотом и углеродом, а также кислородом в различных соединениях. Во всех образцах можно выделить основной максимум в области  $181,7 \pm 0,1$  эВ, который соответствует нитриду циркония  $ZrN_{1+x}$ . Пики в области  $(179,3 \pm 0,1)$  эВ близки по значению связям Zr-N, Zr-C. Это подтверждается наличием в спектрах N1s максимумов в области 396,4 - 397,1 эВ и 395,9 эВ. Последнее значение несколько ниже, чем полученное для стехиометрического нитрида. Такое значение энергии связи азота приписывают так называемым сверхстехиометрическим  $ZrN_{1+x}$ .

В спектрах N1s в области 395,0-398,0 эВ наблюдаются пики, соответствующие соединениям азота с цирконием ZrN<sub>x</sub>. Пик в низкоэнергетической области с энергией связи ~398,8 эВ соответствует N-C связи, ~399,9 эВ N=C связи [3].

В спектрах C1s наблюдаются несколько максимумов, наиболее интенсивный из которых приходится на энергию межатомных связей 284,3±0,1 эВ, соответствующую связям C-C в углеводородных поверхностных загрязнениях или графите. Пик в области (281,4–282,7) эВ соответствует связи углерода с металлом (Zr-C, Zr-C-N). Достоверно установить принадлежность этой связи карбиду или карбонитриду циркония невозможно из-за близости энергий связи Zr3d в этих соединениях. Пик в области 285,1 эВ свидетельствует о наличии sp<sup>3</sup>-гибридизированных связей и формировании алмазоподобной фазы.

Результаты исследований механических и трибологических характеристик представлены в таблице 2. Можно видеть, что сформированные покрытия обладают высокой твердостью. С ростом содержания углерода в покрытии твердость падает, что вероятно связано с преобладанием sp<sup>2</sup> гибридизированных связей между атомами углерода.

Таблица 2 – Характеристики покрытий ZrCN-DLC

№ процесса	Твердость покрытия, ГПа	Коэффициент бесшумного трения
1	43	0,86
2	30	0,38
3	18	0,17

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Abadías, G. Stress and preferred orientation in nitride-based PVD coatings // Surface and Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 2223-2235.
2. Binder, S. Phase equilibria in the systems Ti-C-N, Zr-C-N and Hf-C-N / S. Blinder, W. Lengauer, P. Ettmayer, J. Bauer, J. Debuigne, M. Bohn // Journal of Alloys and Compounds. – Vol. 217. – Issue 1. – P. 128-136.
3. Zocco. Mechanical and tribological properties of CN<sub>x</sub> films deposited by reactive laser ablation / A. Perrone, E. Broitman, Z. Czigany, L. Hultman, M. Anderle // Diam. Relat. Mater. – 2002. – Vol. 11. – P. 98-104.

УДК 539.30

### ПРОДОЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В АДГЕЗИОННОМ ПОКРЫТИИ СТЕРЖНЯ

Холодарь Б.Г.

Брестский государственный технический университет,

Брест, Республика Беларусь

Для решения задачи используется модель в виде стержня длиной  $L$  с круглым поперечным сечением радиуса  $R$ , с модулями упругости первого и второго рода  $E_c$  и  $G_c$ , коэффициентом линейного теплового расширения  $\alpha_c$  с нанесенным на него слоем покрытия постоянной толщины. Покрытие имеет толщину  $h$ , модули  $E_n$  и  $G_n$ , коэффициент линейного теплового расширения  $\alpha_n$ . Так как процесс нанесения покрытия занимает достаточно продолжительный период, на момент

его окончания температуры стержня и покрытия принимаются одинаковыми ( $T_n$ ). После завершения процесса происходит охлаждение материалов до температуры  $T_k$ , так что в них имеет место перепад температур  $T = T_k - T_n$ , вызывающий остаточные напряжения, уровень которых зависит от физико-механических параметров материалов и координат точек тела. Продольная координата -  $x$ , радиальная координата -  $r$ . Сечение стержня с покрытием при  $x=0$  - неподвижно, при  $x=L$  - свободно. Так как предполагается, что при эксплуатации стержня с покрытием оба материала будут испытывать неоднократное нагружение, то задача далее ставится в упругой постановке. Ввиду того, что толщина адгезионного слоя сравнительно с радиусом стержня очень мала ( $h \ll R$ ), а внешняя поверхность покрытия (при  $r=R+h$ ) свободна от нагрузок, радиальными напряжениями пренебрегаем. Учет окружных напряжений производится отдельно.

Для смещений точек поперечных сечений примем некоторые законы в виде зависимостей по радиальному и осевому направлениям так, чтобы, с одной стороны, обеспечивалось равенство перемещений на границе слоев и имела возможность удовлетворить граничным условиям на торцах и внешней поверхности объекта, а с другой, чтобы задача приводилась к аналитическому решению и позволяла проводить наглядный анализ влияния различных параметров на уровень напряженного состояния материалов стержня и покрытия. С этой целью для перемещений точек стержня используем выражение

$$U_c = U_0(x) + K(x) \cdot r^2 / 2 + a_c T x, \quad r \leq R \quad (1)$$

а для точек покрытия -

$$U_n = U_0(x) + K(x) \cdot R^2 / 2 + \gamma_1(x) \cdot (r-R) + \gamma_2(x) \cdot (r-R)^2 / 2 + a_n T x + V_0 x, \quad r > R \quad (2)$$

где  $U_0(x), K(x), \gamma_1(x), \gamma_2(x), V_0$  - функции и константа, подлежащие определению.

Слагаемое  $V_0 x$  выделено из  $U_0(x)$  для удобства и наглядности с тем, чтобы при  $r=R$  значения перемещений точек стержня и покрытия при различных значениях коэффициентов теплового расширения их материалов были бы во всех точках оси  $x$  одинаковыми. При этом найдем, что  $V_0 = (a_c - a_n) T$ .

В соответствии с (1) и (2) распределение продольных напряжений по радиусу является квадратичным, касательных - линейное (рис.1).

Задача об определении законов распределения напряжений вдоль продольной оси сводится к определению функции  $K(x)$ .

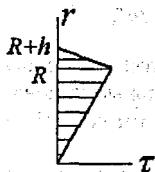


Рисунок 1 - Распределение касательных напряжений по сечению

Обозначив  $\lambda^2 = 2 \frac{G_c}{E_c \left( \frac{R^2}{4} - A \right)}$ ,

где  $A = \frac{R^4 E_c}{4} + E_n \frac{(2R+h)h}{2} R^2 + \frac{E_n G_c}{G_n} \frac{2Rh^2 \left( R + \frac{5h}{8} \right)}{3}$ ,  
 $B = R^2 E_c + (2R+h)h$ ,

получаем для  $K$  разрешающее уравнение задачи

$$\frac{\partial^2 K}{\partial x^2} + \lambda^2 K = 0.$$

В рассматриваемом случае  $\lambda^2 < 0$ , поэтому с учетом граничных условий решение имеет вид:

$$K(x) = (\alpha_c - \alpha_n) T \cdot \frac{(2R+h)hE_n}{\lambda \left( \frac{R^2}{4} - \frac{A}{B} \right) B} \cdot \frac{Sh(\lambda x)}{Ch(\lambda L)},$$

$$U_0(x) = -\frac{A}{B} K(x) - \frac{E_n(2R+h)h}{B} V_0 x.$$

Выражения для интересующих нас напряжений следующие:

- продольные напряжения в стержне

$$\sigma_c(r, x) = (\alpha_c - \alpha_n) T \cdot \frac{E_c E_n (2R+h)h}{B} \cdot \left[ i - \frac{r^2}{2} \frac{A}{B} \frac{Ch(\lambda x)}{Ch(\lambda L)} \right],$$

- продольные напряжения в покрытии

$$\sigma_n(r, x) = \left[ 1 - \frac{E_n(2R+h)h}{B} \left( 1 - \frac{1}{R^2} \frac{A}{B} \left( \frac{R^2}{2} + \frac{A}{B} + R \frac{G_c}{G_n} (r - R_c) \left( 1 - \frac{r-R}{2h} \right) \right) \frac{Ch(\lambda x)}{Ch(\lambda L)} \right) \right],$$

- касательные напряжения на границе стержень-покрытие

$$\tau_{nc}(x) = (\alpha_c - \alpha_n) T G_c \frac{(2R+h)h R E_n}{\lambda \left( \frac{R^2}{2} - \frac{A}{B} \right) B} \cdot \frac{Sh(\lambda x)}{Ch(\lambda L)}.$$

Как видно из приведенных выражений, все напряжения ограничены, а компоненты напряженно-деформированного состояния пропорциональны разности температуры напыления и финишной температуры остывания стержня. Вопрос о времени релаксации данных напряжений не рассматривается.

При расчетах использованы следующие числовые данные:

$$T_n = 303^\circ K, T_c = 293^\circ K, E_c = 210 \text{ ГПа}, E_n = 350 \text{ ГПа}, \alpha_c = 12.7 \cdot 10^{-6}, \alpha_n = 6.2 \cdot 10^{-6}, \\ \nu_c = \nu_n = 0.3, R = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}, L = (3.25-4.0) \cdot 10^{-2} \text{ м}, h = (1.0-2.0) \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Максимальные значения продольных напряжений в покрытии при варьировании  $h$  и  $L$  изменялись незначительно ( $\sigma_n \approx 22.7 \text{ МПа}$ ), касательные изменялись от  $\tau_n \approx 0.5 \text{ МПа}$  при толщине слоя  $h = 1 \text{ мк}$  и длине стержня  $32.5 \text{ мм}$  до  $\tau_n \approx 1.0 \text{ МПа}$  при  $h = 4 \text{ мк}$  и  $L = 40.0 \text{ мм}$ .

Во всех случаях длина участка стержня с повышенными напряжениями не превышала одного миллиметра. С ростом толщины покрытия длина этого участка возрастает.

Характер изменения напряжений иллюстрируется кривыми на рис.2 и рис.3.

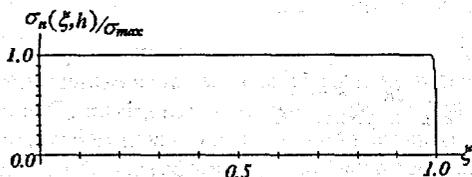


Рисунок 2 – Продольные напряжения в покрытии на уровне его внешней поверхности

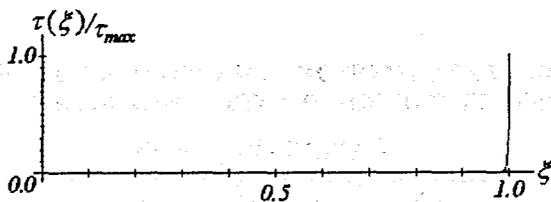


Рисунок 3 – Касательные напряжения на поверхности контакта покрытия со стержнем

В целом, характер напряженного состояния соответствует решениям для двухслойных пластин при остывании или усадке материалов. В зоне, прилегающей к свободному торцу стержня, имеет место резкое изменение напряженного состояния и возникновение больших касательных напряжений на поверхности контакта материалов стержня и покрытия. Проявившаяся особенность данной задачи – высокие осевые напряжения в самом стержне в примыкающей к торцевой поверхности зоне, хотя соответствующие им продольные силы невелики. Объясняется данный факт знакопеременным по радиусу стержня распределением этих напряжений возле его торца. Для уточнения решения необходимо удовлетворение условию равенства нулю касательных напряжений на торце стержня. Решения подобного рода известны, но по максимальному уровню возникающих напряжений вносимая ими поправка не является значительной.

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Иванов В.П., Уваров Г.А.*

Полоцкий государственный университет,  
Новополоцк, Республика Беларусь

**Введение.** Органолептическое диагностирование агрегатов, использующее тактильные и слуховые возможности человека, дает субъективные и недостоверные результаты. Получают развитие инструментальные способы диагностирования, в которых ведущее место занимает виброакустический способ. Трудности определения технического состояния автомобильных двигателей с его помощью заключаются в корректной интерпретации полученных результатов. В силу конструктивного многообразия двигателей их обобщенная виброакустическая модель малопродуктивна. По мере исчерпания ресурса двигателя его виброакустический образ изменяется в широких пределах. Разброс значений измеряемых параметров даже в группе исправных двигателей, как правило, превышает изменения, характерные для зарождающихся дефектов [1].

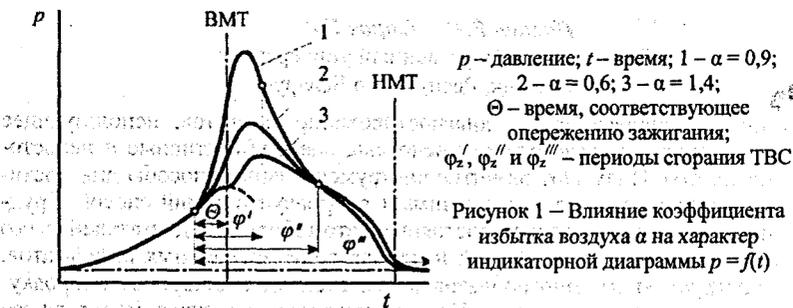
**Цель работы** – повышение информативности и чувствительности инструментального диагностирования автомобильных бензиновых двигателей путем разработки диагностической экспертной системы (ДЭС).

**Содержание.** Большинство систем управления бензиновыми двигателями с программами самодиагностирования выявляют как неисправности электрических цепей, так и считывают множество текущих параметров. Причины возможного отклонения рабочих параметров от номинальных значений многообразны. Часть из них, в том числе комплексные неисправности, не может быть достоверно определена системами самодиагностирования. Точное установление неисправности или их сочетаний, достигается в результате дополнительно-го диагностирования путем последовательной выборочной проверки наиболее вероятных предположений.

На кафедре технологии конструкционных материалов Полоцкого государственного университета создана ДЭС, апробированная на предприятиях автосервиса Новополоцка, включающая аппаратную и программную части. Аппаратная часть состоит из портативного компьютера со сканером диагностических кодов, датчиков виброускорения, электромагнитной индукции и тока. Программная часть включает в себя: оболочку сканера кодов, двухканальный USB-осциллограф, спектро-анализатор, средство анализа и оценки диагностической информации, базы данных о конструкциях двигателей. Кроме традиционных задач диагностирования, система оценивает работоспособность вспомогательных систем, выявляя пропуски воспламенения и нарушение смесеобразования.

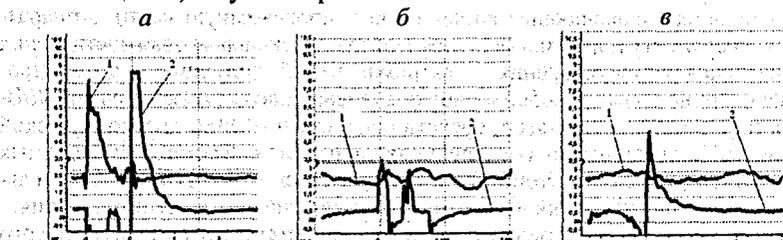
Исследовалась возможность диагностирования системы питания бензинового двигателя по параметрам плазменной дуги, возникающей между контактами свечи зажигания в совокупности с параметрами виброакустического сигнала, сопровождающего процесс воспламенения и сгорания топливно-воздушной смеси. Напряжение искрового пробоя, напряжение и длительность горения дуги при исправной системе зажигания зависят от состава топливной смеси и степени сжатия [2]. При воспламенении и сгорании смеси в цилиндре импульс дав-

ления газов возбуждает колебания стенок корпусной детали. Энергия колебаний зависит от энергии воспламенения и скорости горения смеси, которая, в свою очередь зависит, от коэффициента избытка воздуха, угла опережения зажигания (рис. 1) и качества процессов газообмена.



Датчик электромагнитной индукции позволяет наблюдать параметры искрового пробы на контактах свечи зажигания, датчик виброколебаний — определять относительную энергию воспламенения и сгорания ТВС, флуктуацию параметров горения, определять пропуски воспламенения, самовоспламенение и детонацию (осциллограф при этом синхронизируется по сигналу от датчика электромагнитной индукции) (рис. 2). Датчик тока индукционного типа позволяет определить относительную компрессию в цилиндрах по силе тока, потребляемого стартером.

Методы диагностирования высоковольтной части системы зажигания, виброакустического диагностирования и определения компрессий в цилиндрах по силе тока, потребляемого стартером, взаимно дополняют друг друга, используя изображения на осциллографе, поэтому их сочетание позволяет повысить эффективность каждого из них. Сканер диагностических кодов позволяет устанавливать неисправности, связанные с электронной составляющей системы управления бензиновым двигателем, а также считывать текущие рабочие параметры. Сложность анализа получаемых при диагностировании данных состоит в том, что при одном и том же проявлении признака неисправности, причины, вызывающие ее, могут быть различными.



$a$  — амплитуда электромагнитного импульса искрового пробы (1) большая, виброакустический отклик (2) сильный (ТВС переобогащенная);  $б$  — амплитуда электромагнитного импульса искрового пробы малая с сильной флуктуацией, виброакустический отклик слабый (неисправна свеча зажигания);  $в$  — амплитуда электромагнитного импульса искрового разряда малая, виброакустический отклик сильный (ТВС переобедненная)

Рисунок 2 — Характер диагностических сигналов

Использование ДЭС позволяет оптимизировать процесс диагностирования. Порядок выполнения операций при диагностировании определяется диагностической программой, состоящей из математических и логически связанных алгоритмов. Особенностью диагностирования автомобильных двигателей (как сложной системы) по параметрам виброакустических колебаний является многозначность информации, содержащейся в сигнале. Представление информации на основе постулатов теории нечетких множеств облегчает ее использование [3].

Предлагаемая ДЭС, имитируя рассуждения об объекте, алгоритмах и результатах диагностирования, делает их быстрыми и безошибочными. Неопределенность и неполнота диагностических данных отображается в виде числовых значений и диаграмм, используя систему предикатов

$$a_n + b_n + c_n = 1, \quad (1)$$

где  $a_n$  – показатель неполноты информации о состоянии  $n$ -го элемента (0,1–0,8);  $b_n$  и  $c_n$  – показатели неисправности и исправности  $n$ -го элемента (0,1–0,9), соответственно.

Степень определенности неисправности  $p_n$   $n$ -го элемента

$$p_n = (1 + b_n - c_n) / 2. \quad (2)$$

Определенность неисправности  $P_x$  диагностируемой системы  $E_x$

$$P_x = 1 - \prod p_n Q_x^N N^N, \quad (3)$$

где  $N$  – общее число диагностируемых элементов системы  $E_x$ ;  $Q_x$  – размерный коэффициент.

При этом

$$E_x \equiv \sum p_n Q_x = 1. \quad (4)$$

Из (4) следует, что

$$Q_x = 1 / \sum p_n. \quad (5)$$

Предикат (3) справедлив для системы, состоящей как из исправных, так и неисправных элементов. Предлагаемая методика отличается от существующих в других областях техники с учетом конструктивных особенностей автомобильных двигателей и используемых для диагностирования инструментальных средств.

**Заключение.** Для целей повышения эффективности определения технического состояния автомобильных двигателей представляется целесообразным диагностическую информацию задавать сведениями об объекте (явлении), признаками и значениями. При анализе данных следует использовать экспертные алгоритмы, а диагностические заключения представлять в виде числовых значений и диаграмм, отражающих степень полноты и точности исходных данных.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баркова, Н.А. Современное состояние виброакустической диагностики машин / Н.А. Баркова. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.ru>.
2. Шароглазов, Б.А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания» / Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2004. – 344 с.
3. Zadeh, L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. – 1973. – S. 3, 28–44.

## СТЕНДОВАЯ ОБКАТКА ДВИГАТЕЛЕЙ С ЗАДАНИЕМ ЕЕ РЕЖИМОВ ПО МОЩНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Андруш В.Г.

Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь.

Количество отказов и неисправностей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в общей структуре отказов для отдельных машин достигает 35-55%, удельный вес отремонтированных машин достигает 70-80% при моторесурсе, составляющем до 80% от ресурса новых, поэтому по-прежнему остается актуальной задача повышения качества ремонта двигателей и снижения расхода топливно-энергетических ресурсов [1].

Ремонт машины значительно дешевле приобретения новой. Отношение стоимости ремонта машины к цене новой уменьшилось в последнее время с 30-40 до 20-28%, а двигателей – с 40-60 до 22-30%. Эти изменения вызваны ростом цен на новую технику и снижением стоимости ремонта, что позволяет экономить по Республике Беларусь около 50 млрд. руб. в сравнении с закупкой такого же количества новых двигателей [2].

Обкатка – важнейшая завершающая технологическая операция ремонта тракторного двигателя. Цель обкатки не только в подготовке поверхностей трения к восприятию эксплуатационных нагрузок, но и в выявлении и устранении дефектов деталей, сборки сопряжений.

За счет высококачественной обкатки на ремонтном предприятии межремонтный срок службы двигателя увеличивается на 8-36% [3].

При производстве и особенно ремонте ДВС, действуют факторы неидентичности технологии изготовления, сборки и регулировки. Все это формирует так называемые индивидуальные особенности двигателей и является причиной того, что даже у конструктивно одинаковых образцов при работе имеет место значительный разброс их параметров.

Нормируемые режимы рассчитаны на двигатель с усредненными выходными параметрами, без учета индивидуальных показателей. И, как показывает практика, некоторые двигатели достигают состояния обкатанных за более короткое время, а отдельные, с большой мощностью механических потерь в начале обкатки, не успевают приработаться, перегреваются при обкатке и даже выходят из строя – заклинивают.

Исследования показали, что на мощность механических потерь при обкатке, кроме частоты вращения, наибольшее влияние оказывают мощность механических потерь в начале обкатки, температура масла и средняя скорость изменения мощности механических потерь [4].

Применение при обкатке системы автоматического регулирования по частоте вращения и нагрузочному моменту обеспечивает увеличение межремонтного пробега на 3%, а при автоматическом регулировании и рациональном режиме – на 4,8% [5, с.131].

Учитывая сложность технологического процесса, и особенно проведения обкатки с учетом индивидуальных особенностей ДВС, нами было разработано устройство автоматического задания продолжительности и проведения приработки.

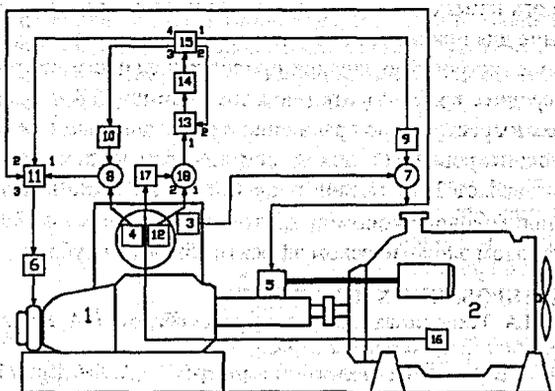
Эта схема позволяет реализовать алгоритм выбора необходимой продолжительности обкатки, т.е. задавать продолжительность этапов приработки в зависимости от температуры масла, средней скорости изменения мощности механических потерь, мощности механических потерь в момент измерения и автоматизировать обкатку.

Блок-схема разработанного устройства управления обкаточным стендом, представлена на рисунке 1.

Если частота вращения обкатываемого двигателя 2 превышает установленное значение, то сигнал (напряжение) на выходе первого вычитающего элемента 7 вызывает перемещение штока исполнительного механизма 5 и рычага топливodoзирующего органа двигателя 2 на уменьшение частоты вращения. Если частота вращения становится меньше установленного значения, то все процессы происходят в обратном направлении.

Аналогично работает контур управления тормозной мощностью по нагрузочному моменту. На втором вычитающем элементе 8 сравнивается сигнал датчика 10 нагрузочного момента и датчика 4 нагрузочного момента. Сигнал с выхода второго вычитающего элемента 8 через первый вход переключателя 11 поступает на исполнительный механизм 6 нагрузочного устройства, изменяя сопротивления или противо-ЭДС в цепи фазного ротора, заставляет нагрузочное устройство (электродвигатель) 1, работающее в режиме динамического торможения, изменять величину тормозной мощности (нагрузочного момента).

Информационным параметром хода приработки является величина мощности механических потерь, которая, в свою очередь, определяется по показанию датчика 12 момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала на весовом механизме стенда на фиксированной частоте вращения.



- 1 – нагрузочное устройство; 2 – обкатываемый двигатель; 3 – датчик частоты вращения; 4 – датчик нагрузочного момента; 5 – исполнительный механизм частоты вращения; 6 – исполнительный механизм нагрузочного устройства; 7 – первый вычитающий элемент; 8 – второй вычитающий элемент; 9 – задачник частоты вращения; 10 – задачник нагрузочного момента; 11 – переключатель; 12 – датчик момента сопротивления прокручиванию; 13 – устройство опроса; 14 – блок назначения длительности приработки; 15 – блок управления; 16 – датчик температуры; 17 – линеаризатор; 18 – третий вычитающий элемент

Рисунок 1 – Блок-схема устройства управления стенда для обкатки

Измерение производится на фиксированной частоте вращения с тем расчетом, чтобы каждый раз не учитывать влияние частоты вращения коленчатого вала на мощность механических потерь. Этим уменьшаем число влияющих факторов, объем исследовательских работ и упрощаем алгоритм управления.

Но, как показано выше, в процессе обкатки мощность механических потерь существенно зависит от начальной мощности механических потерь, температуры масла обкатываемого двигателя, продолжительности обкатки и средней скорости изменения мощности механических потерь.

Для того, чтобы реализовать алгоритм задания продолжительности приработки, сократив общее ее время, измеряют датчиком 12 момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала на фиксированной частоте вращения обкатываемого двигателя и датчиком 16 температуру масла обкатываемого двигателя, вычисляют на линейаризаторе 17 мощность механических потерь при данной температуре. Затем на третьем вычитающем элементе 18 сравнивают мощность механических потерь обкатываемого двигателя с мощностью механических потерь, соответствующей обкатанным.

Сигнал, равный разности между величиной мощности механических потерь обкатываемого двигателя при данной температуре и величиной мощности механических потерь обкатанного двигателя с учетом выбранного рационального значения средней скорости изменения мощности механических потерь с выхода третьего вычитающего элемента 18 поступает на вход устройства 13 опроса, на котором запоминается. В зависимости от величины этого сигнала блоком 14 назначается продолжительность приработки. Чем меньше эта разность и выше средняя скорость изменения мощности механических потерь, тем меньше время, необходимое для приработки обкатываемого двигателя.

Разработанное устройство задания продолжительности приработки позволяет сократить среднее время обкатки не менее чем на 15% с экономией топливно-энергетических ресурсов по сравнению с рациональным режимом.

Чистый дисконтированный доход при программе ремонта 771 двигатель ЯМЗ-236М составляет 3673 тысячи рублей, срок возврата капитальных вложений 2,3 года при годовой экономии 2,2 тонны дизтоплива и 13955 кВт·ч электроэнергии, годовом экологическом эффекте 159 тысяч рублей.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коваленко, Н.А. Техническая эксплуатация автомобилей / Н.А. Коваленко, В.П. Лобач, Н.В. Вепринцев. – Минск : Новое знание, 2008. – 352 с.
2. Лабушев, Н.А. В Новый год с надежным партнером / Н.А. Лабушев // Белорусское сельское хозяйство. – 2007. – №12. – С. 22–24.
3. Стрельцов, В.В. Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей / В.В. Стрельцов, В.Н. Попов, В.Ф. Карпенков. – М.: Колос, 1995. – 175 с.
4. Андруш, В.Г. Селективное установление продолжительности обкатки двигателей / В.Г. Андруш. Научно – технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы МНПК: в 3т. – Минск: РУП НПЦ НАНБ по механизации с.х. – 2011. – Т.3. – С. 120-124.
5. Дюмин, И.Е. Повышение эффективности автомобильных двигателей / И.Е. Дюмин. – М.: Транспорт, 1987. – 176 с.

## УПРОЧНЕНИЕ ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ПРИ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИИ НАПЛАВКОЙ

*Кастрюк А.П., Вигерина Т.В.*

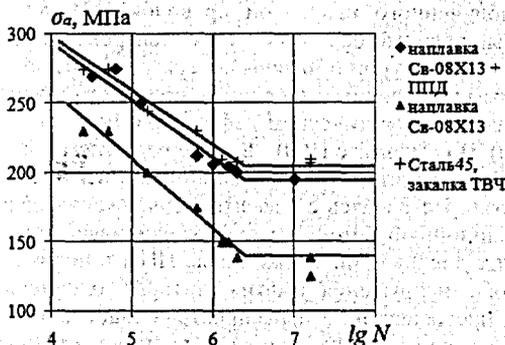
Полоцкий государственный университет,  
Новополоцк, Республика Беларусь

В настоящее время 50-80 % всех известных способов восстановления деталей машин связаны с различными способами наплавки [1]. Наплавленные покрытия труднообрабатываемы и приводят к снижению усталостной прочности. Это определяют характерные дефекты наплавленных слоев металла, к которым относятся пористость, наличие трещин, неоднородность химического состава и структуры, наводороживание с возникновением растягивающих остаточных напряжений. Применение ППД в качестве одной из операций чистой обработки наплавленных поверхностей может уменьшить влияние некоторых из приведенных дефектов, благодаря чему в поверхностном слое возникают сжимающие напряжения, способствующие повышению усталостной прочности деталей на 30-60 % и износоустойчивости – в 1,5-1,7 раза со снижением шероховатости поверхности упрочняемой детали. В результате применения поверхностного пластического деформирования (ППД) в технологии восстановления деталей возможно восстановление эксплуатационных свойств до показателей новых деталей.

Наша задача сводилась к обоснованию выбора материала, который после наплавки обладает высокой склонностью к упрочнению ППД и выбору режимов его обработки.

Упрочнение материала при деформировании можно объяснять с помощью дислокационной теории [2], из которой следует, что дислокации концентрируются возле линий скольжения. Около дислокаций образуются поля напряжений, поэтому для дальнейшего их распространения необходимо приложение большего усилия по сравнению с усилием для деформирования неупрочненного материала. Перемещающиеся дислокации задерживаются, если встречают на своем пути препятствия в виде других дислокаций, границ зерен или стенок кристаллов, что объясняет повышение усталостной прочности после ППД и

подтверждается экспериментальными данными, приведенными на рисунке 1.

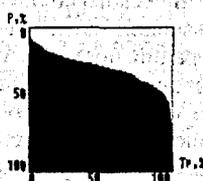


$\sigma_a$  – амплитуда переменных напряжений;  $N$  – число циклов нагружения до разрушения образца

Рисунок 1 – Кривые усталости образцов: упрочненных закалкой ТВЧ, наплавленных с упрочнением, наплавленных с упрочнением ППД

Способность материала к деформационному упрочнению зависит в большой степени от его структуры [2]. С увеличением содержания углерода в сталях пропорционально снижается и прирост твердости, несмотря на повышение усилия прижатия инструмента к заготовке [3]. Степень пластической деформации  $\epsilon$  при обкатывании роликом с усилием прижатия  $P = 2900$  Н равна 0,3.

Исследования микрорельефа поверхности детали, проведенные с помощью анализа профилограмм и кривых опорных поверхностей после различных видов обработки, показали, что введение операции ППД после чистового шлифования позволяет улучшить микропрофиль поверхности, а именно, происходит смятие острых кромок микронеровностей и перераспределение материала в шероховатом слое (рисунок 2).



P, мкм	Tr, мкм	P, мкм	Tr, мкм
5	8,5	40	84,6
10	4,6	50	95,5
15	18,3	60	98,1
20	22,6	70	98,8
25	43,8	80	99,8
30	64,6	90	99,3

P, мкм	Tr, мкм	P, мкм	Tr, мкм
5	2,8	40	98,9
10	9,7	50	99,2
15	14,1	60	99,4
20	41,8	70	99,5
25	87,1	80	99,7
30	96,5	90	99,7

$R_a = 0.490$  мкм     $R_z = 2.357$  мкм  
 $R_{max} = 3.791$  мкм     $S_m = 40.60$  мкм

$R_a = 0.165$  мкм     $R_z = 1.075$  мкм  
 $R_{max} = 2.571$  мкм     $S_m = 31.01$  мкм

а)

б)

а) шлифование, б) шлифование + ППД + полирование

Рисунок 2 — Кривые опорных поверхностей после различных видов обработки

Микроструктура покрытия, полученного наплавкой проволоки Св-08Х13, представляет собой пересыщенный твердый раствор с мелкодисперсными карбидами хрома. Сплавы с подобной структурой и низким содержанием углерода имеют способность к значительным увеличениям твердости, прочности и износостойкости в результате наклепа (при пластическом деформировании со значительной степенью деформации). В результате ППД в поверхностном слое наплавленного покрытия образуется текстура с повышенной концентрацией дефектов кристаллической решетки. Встречаясь с дефектом, дислокация обходит его, оставляя на нем дислокационную петлю, которая увеличивает сопротивление движению последующих дислокаций. Также после ППД в покрытии возникают внутренние остаточные напряжения сжатия, которые блокируют раскрытие усталостных трещин, превращая их в нераспространяющиеся [4]. В результате наклепа под влиянием контактного давления преимущественная

ориентация структурных составляющих в радиальном направлении изменяется на ориентацию вдоль обрабатываемой поверхности, что с увеличением плотности дислокаций с  $0,566 \cdot 10^7$  до  $0,712 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> препятствуют росту усталостных трещин. Сами дислокации являются препятствиями для перемещающихся дислокаций, что объясняет повышение усталостной прочности после ППД и подтверждается полученными результатами.

Следовательно, введение в технологию восстановления валов наплавкой проволокой Св-08Х13 операции поверхностного пластического деформирования обкаточным роликом с силой его прижатия ролика 2900 Н повышает предел выносливости восстановленных валов на 25–30 %.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Молодык, Н.В. Восстановление деталей машин: справочник / Н.В. Молодык, А.С. Зенкин. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
2. Кравчук, В.С. Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочнённых деталей машин и элементов конструкций / В.С. Кравчук, Абу Айаш Юсеф, А.В. Кравчук. – Одесса: Астропринт, 2000. – 160 с.
3. Пшибыльский, В.В. Технология поверхностной пластической обработки / В.В. Пшибыльский. – М.: Металлургия, 1991. – 479 с.
4. Кудрявцев, И.В. Нераспространяющиеся усталостные трещины / И. В. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

УДК 621.5

### ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗАПРАВКИ АВТОМОБИЛЕЙ

*Довгялло А.И., Угланов Д.А., Цапкова А.Б., Шиманов А.А.*

Самарский государственный аэрокосмический университет  
(национальный исследовательский университет),

Самара, Российская Федерация

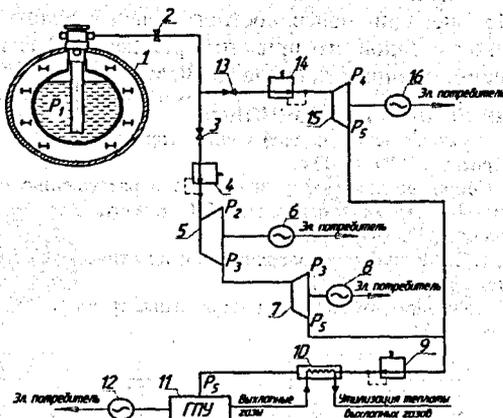
Сжиженный природный газ (СПГ) сегодня находит всё большее применение. Он используется для газификации коммунального хозяйства, промышленных предприятий, автотранспорта в местах и регионах, удаленных от газопроводной системы.

Существует ряд решений, которые позволяют использовать низкотемпературный потенциал СПГ для получения дополнительной энергии [1]. Одним из таких решений является установка в комплекс СПГ газовой турбины за теплообменником-испарителем, с помощью которой можно получить работу, которую затем возможно преобразовать в электрическую энергию. В данной публикации произведён расчёт схемы комплекса СПГ с установленными в нем тремя турбинами. В качестве аккумулятора давления в газификаторе используется ёмкость с криогенной заправкой (ЕКЗ) [2].

На основе ЕКЗ была спроектирована установка, утилизирующая низкопотенциальное тепло, при эксплуатации которой вырабатывается дополнительная электрическая энергия [1]. Энергоустановка, использующая запасённое низкопотенциальное тепло для производства энергии (по терминологии Г.Н. Алексеева [4]), называется теплоотрицательной. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.

Расчеты установки по схеме на рисунке 1 проводились с учетом того, что для ГПУ необходима подача газа под давлением  $p_5 = 0,1$  МПа с расходом газа  $G_2 = 0,042$  кг/с при мощности ГПУ  $N_{ГПУ} = 1011$  кВт.

Для оценки эффективности работы были проведены расчеты предлагаемой установки при различных конечных давлениях в ЕКЗ. Во всех вариантах масса заправленного криопродукта составляет 866 кг. Результаты расчетов приведены в таблице 1.



- 1 – ёмкость с криогенной заправкой (ЕКЗ); 2 – задвижка; 3 – задвижка;  
 4 – редуктор на давление  $P_1$ ; 5 – первая турбина 1 контура; 6 – электрогенератор;  
 7 – вторая турбина 1 контура; 8 – электрогенератор; 9 – редуктор на давление  $P_5$ ;  
 10 – теплообменник; 11 – газопоршневая установка (ГПУ); 12 – электрогенератор;  
 13 – задвижка; 14 – редуктор на давление  $P_4$ ; 15 – турбина 2 контура;  
 16 – электрогенератор

Рисунок 1 – Принципиальная схема теплоотрицательной установки

Таблица 1 – Результаты расчета теплоотрицательной установки

$P$ , МПа	$V$ , м <sup>3</sup>	$\tau_{газиф}$ , ч	$W_1$ турб 1 конт., кВт·ч	$W_2$ турб 1 конт., кВт·ч	$W$ турб 2 конт., кВт·ч	$W_{\Sigma турб}$ , кВт·ч	$W_{ГПУ}$ , кВт·ч	$W_{\Sigma}$ , кВт·ч	$\tau_{эл.эн.}$ , ч
2,5	54,0	25,7	4,2	16,0	16,2	36,4	4303,4	4339,8	4,3
5	27,0	25,4	12,6	16,5	16,5	45,6	4766,2	4811,8	4,7
10	13,5	24,6	25,4	9,7	18,0	53,1	5147,8	5200,9	5,1
15	9,0	24,8	36,0	3,7	19,0	58,8	5360,2	5418,9	5,3
20	6,7	25,6	45,3	2,8	17,5	65,7	5466,6	5532,3	5,4
30	4,5	26,4	54,3	1,9	11,0	67,2	5572,5	5639,7	5,5

Для объективной оценки использования низкопотенциального тепла СПГ в установке на основе ЕКЗ предлагается использовать следующие показатели:

1.  $\Omega_m$  – удельное количество дополнительной энергии, кВт·ч / кг:

$$\Omega_m = \frac{W_{\Sigma}}{m},$$

где  $W_{\Sigma}$  – количество дополнительной энергии, кВт;  $m$  – масса газа в ЕКЗ кг.

2.  $\Omega_p$  – удельное количество дополнительной энергии с учетом давления газификации, кВт·ч / (кг·МПа):

$$\Omega_p = \frac{W_{\Sigma}}{p \cdot m}$$

где  $p$  – давление газа в ЕКЗ после газификации СПГ, МПа.

3.  $\Omega_v$  – удельное количество дополнительной энергии с учетом объема ЕКЗ, кВт·ч / (кг·м<sup>3</sup>):

$$\Omega_v = \frac{W_{\Sigma}}{V \cdot m}$$

где  $V$  – объем ЕКЗ, м<sup>3</sup>.

Результаты сравнительного расчета приведены на рисунке 2.

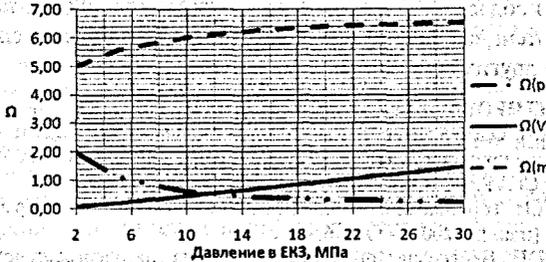
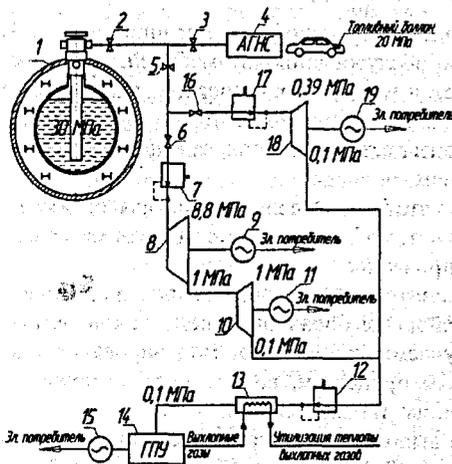


Рисунок 2 – Результаты сравнительного расчета теплоотрицательной установки

Данные показатели позволяют объективно оценить потенциальные возможности получения дополнительной энергии при использовании криопродуктов с последующей их регазификацией в ЕКЗ с учетом эксплуатационных ограничений и расхода рабочего тела. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о перспективности предлагаемого технического решения и о возможности его применения в различных областях техники.

На основе схемы, рассмотренной выше, была спроектирована теплоотрицательная установка, служащая для заправки автомобилей природным газом [1]. Схема установки представлена на рисунке 3.



- 1 – ёмкость с криогенной заправкой (ЕКЗ); 2 – задвижка; 3 – задвижка;
- 4 – автозаправочная станция;
- 5 – задвижка; 6 – задвижка;
- 7 – редуктор на 10 МПа;
- 8 – турбина с  $\pi_r^* = 8,8$ ;
- 9 – электрогенератор; 10 – турбина с  $\pi_r^* = 10$ ; 11 – электрогенератор;
- 12 – редуктор на 0,1 МПа;
- 13 – теплообменник;
- 14 – газопоршневая установка (ГПУ); 15 – электрогенератор;
- 16 – задвижка; 17 – редуктор на 1 МПа; 18 – турбина с  $\pi_r^* = 3,9$ ;
- 19 – электрогенератор

Рисунок 3 – Принципиальная схема комбинированной теплоотрицательной установки

Полученные результаты показали, что оптимальная степень расширения для первой турбины в первом контуре составит  $\pi_m^* = 8,8$ ; для второй турбины в первом контуре  $\pi_m^* = 10$ ; для турбины второго контура  $\pi_m^* = 3,9$ .

Общее количество выработанной электрической энергии составит 3825,22 кВт·ч в течение 225 мин. Время работы теплоотрицательной установки, включая время газификации метана в ЕКЗ, время заправки автомобилей и время выработки электроэнергии, составит 24 ч.

Таким образом, проведенные расчеты показывают перспективность исследования в данной области развития энергетических установок, а также позволяют реализовать потенциал энергосбережения при использовании сжиженного природного газа и других криогенных жидкостей.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Довгялло, А.И. Оценка возможности применения теплоотрицательной энергетики в комплексах сжиженного природного газа / А.И. Довгялло, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов, А.А. Шириманов // Вестник СГАУ. – 2013. – №3. – С. 93-98.
2. Довгялло, А.И. Топливный баллон: пат. 2163699, Российская Федерация / А.И. Довгялло, С.В. Лукачев [и др.]. – 2001. – Бюл. 6. – 3 с.
3. Алексеев, Г.Н. Прогнозное ориентирование развития энергоустановок. – М.: Наука, 1978. – 200 с.

УДК 629.113:004.94

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ОБЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

*Монтик С.В., Санюкевич Ф.М.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

При проектировании и реконструкции автотранспортных предприятий (АТП) возникает задача оптимизации средств обслуживания автомобилей, т. е. определение оптимального количества постов зон диагностирования, технического обслуживания (ТО), текущего ремонта автомобилей по критерию минимальных суммарных затрат на содержание производственного подразделения и потери прибыли от простоя автомобилей.

Наиболее широко используемыми методами моделирования для оптимизации структуры средств обслуживания автомобилей являются теория массового обслуживания и имитационное моделирование.

Целью данной работы является сравнительный анализ методик моделирования средств обслуживания автомобилей для выбора наилучшей для конкретных условий на основании сравнения получаемых результатов моделирования, адекватности реальным производственным процессам, возможности выполнения оптимизации структуры производственных подразделений.

Сравнение методик моделирования выполнялось на примере моделирования зоны первого технического обслуживания (ТО-1) автобусов комплексного авто-

транспортного предприятия. Первоначально для заданного количества автобусов был выполнен технологический расчет по типовой методике, изложенной в [1, 2]. Расчет проводился для следующих исходных данных: 70 автобусов МАЗ-203; III категория условий эксплуатации; климатический район – умеренный, пробег с начала эксплуатации в долях от пробега до списания (ресурса) – до 0,25; количество транспортных средств, обслуживаемых и ремонтируемых в организации – от 100 до 200 единиц; среднесуточный пробег – 250 км. Режим работы зоны ТО: 252 дня в году, 1 смена, длительность смены – 8 часов. Определялись: годовое количество ТО-1 (490 обслуживаний), такт поста  $\tau_{\text{п}}$  (6,86 часа), ритм производства  $R_{\text{п}}$  (4 часа), требуемое количество постов ТО-1 (расчетное 1,75; принятое – 2 поста).

Теория массового обслуживания использовалась для аналитического описания работы зоны ТО. Зона ТО моделировалась с помощью: 1) многоканальной замкнутой системы массового обслуживания (СМО) с простейшими потоками; 2) многоканальной разомкнутой СМО без потерь с неограниченной длиной очереди. Расчет параметров СМО выполнялся по методикам, изложенным в [3].

Для разомкнутой СМО интенсивность поступления требований на обслуживание  $\lambda$  определялась как величина, обратная ритму производства, а интенсивность обслуживания  $\mu$  – как величина обратная такту поста  $\tau_{\text{п}}$ . Для замкнутой СМО интенсивность поступления требований на обслуживание  $\lambda$  определялась как величина, обратная интервалу времени поступления автомобилей в ТО-1  $T_{\text{то-то}}$ , который определялся исходя из количества дней, через которые автомобиль должен поступить на ТО-1.

Для имитационного моделирования процесса функционирования зоны ТО-1, состоящей из одного, двух и трех постов, использовалась система GPSS World Student Version 5.2.2 [4]. При составлении имитационной модели процесса функционирования зоны ТО, зона ТО рассматривалась: 1) в виде разомкнутой СМО с простейшими потоками; 2) в виде замкнутой СМО с простейшими потоками. При этом предусматривалась возможность образования очереди. В имитационной модели в системе GPSS World посты зоны ТО моделировались с помощью одноканальных (Facility) и многоканальных устройств (Storage), а автомобили, требующие ТО, моделировались с помощью транзактов.

Для моделирования простейшего потока требований интервалы времени поступления автомобилей на ТО задавались по экспоненциальному закону. Математическое ожидание интервалов времени поступления автомобилей на обслуживание  $T_{\text{то-то}}$  определялось так же, как и для аналитической модели замкнутой СМО (см. выше). Время моделирования работы зоны ТО-1 составляло 2016 часов, что соответствовало времени работы зоны в течение одного года.

При имитационном моделировании зоны ТО, как разомкнутой СМО, интервалы времени поступления автомобилей на ТО задавались по экспоненциальному закону с математическим ожиданием, равным ритму производства, а интервалы времени на обслуживание одного автомобиля – также по экспоненциальному закону с математическим ожиданием равным такту поста. Для определения показателей работы зоны ТО, как разомкнутой СМО, количество требований на обслуживание, которые поступят в систему в процессе моделирования задавалось равным 1000.

Сравнение имитационных и аналитических моделей зоны ТО выполнялось по следующим параметрам: средняя длина очереди на ТО, среднее время нахождения автомобиля в очереди, среднее число занятых постов ТО, коэффициент загрузки зоны ТО. Данные параметры можно определить в любой из предложенных выше моделей.

Анализ результатов моделирования показывает, что для всех рассматриваемых моделей среднее число занятых постов ТО и коэффициент загрузки зоны ТО отличается незначительно (см. таблицу 1). При этом среднее число занятых постов ТО близко к расчетному требуемому количеству постов зоны ТО (см. выше). Средняя длина очереди и среднее времени нахождения в очереди отличаются для различных моделей в 2,84 раза.

Таблица 1 - Результаты моделирования зоны ТО-1 с 2 постами

	Средняя длина очереди	Среднее время ожидания в очереди, час.	Среднее число занятых постов ТО-1	Коэффициент загрузки зоны ТО-1
Имитационная модель замкнутой СМО	9,68	2,42	1,699	0,849
Имитационная модель разомкнутой СМО	27,51	6,87	1,732	0,866
Аналитическая модель замкнутой СМО	3,92	15,57	1,716	0,858
Аналитическая модель разомкнутой СМО	4,76	19,06	1,715	0,858

Имитационные модели разомкнутых СМО целесообразно использовать для моделирования работы автозаправочных станций и станций технического обслуживания автомобилей, т. к. при этом имитационные модели соответствуют логике функционирования реальных объектов во времени.

При имитационном моделировании функционирования зоны ТО, как многоканальной замкнутой СМО с простейшими потоками, в полной мере отражается организация ТО автомобилей на АТП, которое обслуживает только свой подвижной состав: количество автомобилей при моделировании ограничено и задается первоначально; после обслуживания автомобиль возвращается к выполнению транспортной работы, а затем, после того, как его пробег будет соответствовать скорректированному пробегу до ТО, автомобиль поступает в зону ТО на обслуживание.

Годовое количество ТО-1, определенное по имитационной модели зоны ТО, как многоканальной замкнутой СМО, составляет 501 обслуживание, что незначительно отличается (на 2,3%) от годового количества ТО-1, определенного по типовой методике технологического расчета. Это подтверждает соответствие выбранной модели реальной системе.

Определяемые по результатам моделирования зависимости средней длины очереди автомобилей на обслуживание, среднего времени нахождения в очереди, среднего числа занятых постов зоны ТО и коэффициента загрузки зоны ТО от количества постов в зоне, позволяют определять время простоя автомобиля в очереди и в обслуживании, а также время простоя постов ТО и в дальнейшем

выполнять оптимизацию структуры зоны ТО по критерию минимальных суммарных затрат. Сведения о средней длине очереди на обслуживание позволяют выбрать структуру зоны ТО с необходимым количеством постов ожидания.

Проведенный анализ методик моделирования производственных подразделений автотранспортного предприятия позволяет рекомендовать для моделирования и оптимизации структуры зоны ТО автотранспортного предприятия имитационную модель функционирования зоны ТО, как замкнутой многоканальной СМО с простейшими потоками.

Использование таких моделей дает возможность определить все необходимые данные для нахождения оптимального количества постов зоны ТО по критерию минимальных суммарных затрат на содержание производственного подразделения и потери прибыли от простоя автомобилей при выполнении проектирования или реконструкции автотранспортных предприятий.

Разработанные имитационные модели используются студентами специальности 1 – 37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей» для оптимизации структуры зоны ТО АТП при выполнении курсовой работы по дисциплине «Основы научных исследований и инновационной деятельности» и дипломного проекта.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Техническое обслуживание и ремонт автомобильных транспортных средств. Нормы и правила проведения: ТКП 248-2010 (02190). – Мн.: РУП «БелНИИТ «Транстехника», 2010. – 44 с.
2. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий автомобильного транспорта: ОНТП-01-91. – М.: Росавтотранс, 1991.
3. Коваленко, Н.А. Научные исследования и решение инженерных задач в сфере автомобильного транспорта: учеб. пособие / Н.А. Коваленко. – Минск: Новое знание; М.: ИНФА-М, 2011. – 271 с.
4. Кудрявцев, Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.

УДК 62.529

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЗОН ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Концевич П.С., Головченко Ю.А.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Переход к рыночным отношениям ставит перед работниками автомобильного транспорта ряд новых задач. Сегодня уже мало просто выполнить какую-нибудь работу: например, перевезти грузы определенного объема и номенклатуры. Важно выполнить ее с наибольшей эффективностью. В свою очередь, повышение эффективности возможно только на основе глубоких знаний о тех процессах, которые происходят во всех сферах деятельности автотранспортных предприятий: при перевозках, при поддержании и восстановлении работоспособности автомобилей, при материально-техническом обеспечении и т.д.

Чтобы правильно представлять эти процессы, целесообразно иметь их математические модели, корректно описывающие их свойства, структуру и возможности. В настоящее время на автомобильном транспорте разработано и применяется большое количество разнообразных математических моделей. Однако они обладают одним общим недостатком: рассматривают определенные задачи обособленно, не увязывая процесс перевозок с процессами поддержания и восстановления работоспособности автомобилей, с процессами их старения, материально-технического обеспечения и т.п. Это обусловливается тем, что любой из этих процессов сам по себе является достаточно сложным, а в совокупности они и вообще делают практически невозможным их описание существующими математическими схемами [1].

Авторами сделана попытка провести комплексный анализ зон технического обслуживания автотранспортных предприятий на основе имитационного моделирования, под которым понимается математическое исследование сложных стохастических процессов. При этом эксперимент ставится не на реальной системе, что, как правило, слишком дорого, требует значительного времени и, кроме всего, не всегда возможно, а на компьютерной программе. Оптимальный вариант решения задачи определяется не строгими детерминированными зависимостями, а путем последовательных итераций, перебирая те или иные структуры и численные значения факторов.

Для оценки возможности использования имитационного моделирования при оптимизации зон технического обслуживания АТП была разработана имитационная модель в среде GPSS World, позволяющая имитировать функционирование зон технического обслуживания (ТО) АТП. GPSS World является мощной универсальной средой моделирования как дискретных, так и непрерывных процессов, предназначенная для профессионального моделирования самых разнообразных процессов и систем [2].

Разработанная имитационная модель состоит из следующих основных блоков. Блок исходных данных используется для задания количества подвижного состава (ПС), периодичности ТО-1 и ТО-2, количество постов ТО-1 и ТО-2, время моделирования и т.п. В блоке моделирования начального пробега каждой единице ПС присваивается начальный пробег и проверяется необходимость проведения ТО-1 или ТО-2. В случае необходимости проведения ПС направляется в соответствующую зону, в противном случае он отправляется на линию. В третьем блоке моделируется работа ПС на линии. Здесь для каждого автомобиля случайным образом по заданному закону моделируется среднесуточный пробег и осуществляется учет его общего пробега с начала моделирования. В четвертом блоке моделируется постановка ПС на обслуживание и моделирование процесса ТО-1. В пятом блоке моделируется работы зоны ТО-2.

После завершения моделирования выдаются следующие основные показатели работы группы автомобилей за моделируемый период времени (день, месяц, год и т.д.): число обслуживаний за период моделирования; максимальная длина очереди; число автомобилей, находящихся на линии, в обслуживании и очереди на конец моделирования; среднее время нахождения в очереди, количество неиспользуемых постов на конец моделирования; коэффициент использования зоны; средневзвешенное содержимое очереди и зоны за период моделирования и др.

Программа позволяет варьировать такими параметрами, как количество автомобилей, число постов и их производительность в зонах ТО-1 и ТО-2, периодичность ТО-1 и ТО-2, среднесуточный пробег и др.

Получаемые результаты моделирования можно использовать для решения различных производственно-технических задач:

- оптимизировать размеры и структуру зон ТО-1 и ТО-2 любого АТП;
- планировать объемы работ по техническому обслуживанию на любой прогнозируемый период времени;
- определять оптимальные периодичности технических обслуживаний и решать другие прикладные задачи.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Кузнецов, Е.С. Техническая эксплуатация автомобилей / Е.С. Кузнецов. – М.: Наука, 2004 – 535 с.

2. Рыжиков, Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии / Ю.И. Рыжиков. – СПб.: КОРОНА принт; М.: Альтекс-А, 2004. – 384 с.

УДК 629.331

### **МЕТОДИКА НОРМИРОВАНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ КУЗОВА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОРГАНИЗАЦИЙ АВТОСЕРВИСА**

*Семенов И.Н., Березуцкая С.О.*

Брестский государственный технический университет,  
Брест, Республика Беларусь

Увеличение рынка автомобилей и возрастающий спрос на сервисные услуги побуждает проектировать новые или реконструировать действующие организации автосервиса (ОАС). Нормативное обеспечение методики технологического проектирования ОАС не в полной мере удовлетворяет предъявляемым требованиям. Это связано с разработкой и выпуском большого количества разнотипных легковых автомобилей, для которых не рационально использовать нормативы, усредненные по классам, определяемые лишь только объемом двигателя, как например в ОНТП-01-91. Использование дилерских баз данных (БД) затруднено стоимостью таких источников информации и различием содержащейся в них информации по нормам времени для видов работ, выполняемых на автосервисе по различным маркам автомобилей.

Поэтому в технологическом проектировании ОАС для уточнения нормативов разработка методики нормирования трудоемкостей по видам выполняемых работ является актуальным направлением.

На основании проведенного обзора установлено, что существующие в настоящее время источники информации (БД) по видам выполняемых работ на ОАС и различие нормативов в них затрудняют возможность правильного определения и использования норм времени для технологического проектирования ОАС. Нормативные трудоемкости на антикоррозионную обработку по ОНТП-01-91 существенно (до 3,5 раз) отличаются от информационных источников для автомобилей производства РФ.

По результатам выполненного обзора установлено, что для автомобилей ведущих западноевропейских производителей не обнаружено норм времени для нормирования таких видов работ, как противокоррозионная обработка кузова легкового автомобиля.

Множество различных марок и моделей легковых автомобилей затрудняют использование нормативов стандартных источников информации. Это связано с тем, что в известных источниках информация о нормативах усреднена для классов автомобилей, характеризующихся объемом двигателя.

Более точная информация о нормах времени для каждого автомобиля представлена в дилерских БД. Труднодоступность таких источников создаст ограничение в применении норм времени для технологического проектирования ОАС.

В результате проведенных исследований установлено, что европейская классификация легковых автомобилей наиболее точно учитывает особенности конструкции кузовов по классам. При определении трудоемкостей на противокоррозионную обработку целесообразно использовать европейскую классификацию легковых автомобилей.

Взаимосвязь, выявленная между габаритными размерами кузовов автомобилей и длинами скрптых полостей, а также габаритными размерами кузовов и площадями обрабатываемых поверхностей носит выраженный линейный характер.

Полученные числовые значения коэффициентов корректирования нормы времени на противокоррозионную обработку находятся в пределах: от  $K_{КОР}^A = 1,0$  (для легковых автомобилей класса «А») до  $K_{КОР}^F = 1,81$  (для автомобилей класса «F»).

Установлено, что для автомобилей американского производства и автомобилей класса «MPV» при определении трудоемкости противокоррозионной обработки необходимо учитывать поправочный коэффициент: для американских автомобилей  $K_{USA} = 0,964$  и (или) поправочный коэффициент для автомобилей класса «MPV»  $K_{MPV} = 0,98$ . Это обусловлено особенностями конструкции кузовов соответствующих автомобилей.

Разработанная по результатам выполненных исследований методика нормирования трудоемкостей противокоррозионной обработки кузовов автомобилей позволяет корректировать нормативную трудоемкость противокоррозионной обработки для определенного класса легковых автомобилей.

УДК 629.083

## ТОРМОЗНОЙ МЕХАНИЗМ ПЕРЕДНИХ КОЛЁС ТРАКТОРА

*Волощук А.А.*

Брестский государственный технический университет,

Брест, Республика Беларусь

В условиях рыночных отношений одной из основных задач, стоящих перед промышленностью Республики Беларусь, является повышение технического уровня, надежности и конкурентоспособности автомобильной техники. В области создания и совершенствования автотракторной продукции постоянной задачей было и всегда будет повышение безопасности колесных тракторов.

Энергоемкость современных тракторов очень высокая, их движение осуществляется с большой транспортной скоростью, они агрегируются с прицепами и полуприцепами. Соотношение масс трактора и прицепа достигает высокого значения, и масса прицепа может в 2 раза превышать массу трактора.

Правила ЕЭК ООН №13 [1] предъявляют требования к рабочей тормозной системе такие, чтобы она воздействовала на все колеса транспортного средства.

На сегодняшний день у серийного трактора рабочая тормозная система действует только на задние колеса. У трактора с передним ведущим мостом (ПВМ) торможение передних колес происходит за счет кинематической связи трансмиссии с задними колесами. Если трактор без ПВМ, то передние колеса и вовсе не участвуют в торможении.

Возникает проблема создания тормозных механизмов передних колес трактора, и поэтому она должна быть решена.

Проектирование колесного тормоза всегда начинается с определения нагрузки, которую несет на себе передний мост трактора. Для этого лучше всего использовать методы моделирования динамики движения колесных машин.

Моделирование динамики движения колесных машин требует разработки математических моделей, включающих расчетные схемы и дифференциальные уравнения движения, отражающих специфические особенности конструкции машин и их массо-геометрические параметры. Основой математической модели являются дифференциальные уравнения движения и расчетная схема.

Для механических систем с упруго-диссипативными связями, для составления дифференциальных уравнений движения (динамические уравнения) широкое применение получило уравнение Лагранжа второго рода [2]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + Q_{q_i}, \quad (1)$$

где  $T$ ,  $\Pi$ ,  $D$  – соответственно кинетическая и потенциальная энергия системы, и диссипативная функция (функция рассеивания);  $Q_{q_i}$  – внешняя сила, действующая вдоль координаты  $q_i$ .

Уравнение Лагранжа (1) позволяет автоматизировать процедуру составления дифференциальных уравнений движения механических систем за счет того, что исключаются реакции связей между массами системы. В то же время, способы вычисления кинетической энергии системы и обобщенных сил для каждой механической системы требуют учета специфических особенностей механической системы (особенности кинематических связей системы). Вычисление обобщенных сил  $Q_{q_i}$  также необходимо производить с учетом особенностей обобщенных координат (линейные, угловые, сферические, полярные и др.) и соблюдения принципа виртуальных перемещений.

В результате моделирования динамики движения трактора мы определим расчетные нагрузки, которые позволят эффективно использовать сцепной вес его передних колес при торможении.

Следующая немаловажная задача – создание привода тормозного механизма. Как и все многоосные и многозвенные системы, трактор оснащен пневматическим, гидравлическим и комбинированным пневмогидравлическим приводами тормозных механизмов. Все эти приводы дают сложность конструкции.

Дисковый и барабанный тормозные механизмы колёс являются самыми распространёнными на сегодняшний день. Каждый из них имеет преимущества и недостатки.

Главное преимущество барабанного тормозного механизма в том, что его мощность (площадь пятна контакта колодок с поверхностью барабана) можно очень легко повысить за счёт увеличения как диаметра барабана, так и его ширины. Мощность дискового тормозного механизма может быть повышена за счёт увеличения диаметра диска, который в большинстве случаев ограничен размером обода колеса, внутри которого тормозной диск установлен. Барабанный тормозной механизм сравнительно хорошо защищён от попадания воды и пыли, его колодки намного меньше изнашиваются на запылённой или грунтовой дороге, чем открыто установленные колодки дискового тормозного механизма, что делает его более долговечным и вообще более подходящим для плохих дорожных условий. Использование барабанных тормозов упрощает оснащение автомобиля стояночным тормозом. В то же время, барабанный тормозной механизм срабатывает медленнее, чем дисковый, имеет менее стабильные характеристики (что в первую очередь обусловлено непостоянством пятна контакта колодки и внутренней поверхности тормозного барабана) и меньшие возможности для регулировки. В случае повышения температуры торможение дисковым тормозным механизмом довольно стабильное по своим характеристикам (за счёт хорошего охлаждения), в отличие от барабанного тормозного механизма.

Для передних колёс трактора требуется такая конструкция тормозного механизма, которая сможет разместиться в ограниченном пространстве переднего колеса и не внесет значительного изменения в конструкцию передней оси.

Сложность использования барабанного или дискового тормозного механизма для передних колёс трактора заключается в том, что без существенных изменений конструкции передней оси трактора данные тормозные механизмы не могут быть установлены.

На момент написания данной статьи ведется работа по изготовлению опытного образца тормозного механизма, который не внесёт больших изменений в конструкцию передней оси трактора.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения: ГОСТ Р 41.13-99 (Правила ЕЭК ООН N 13) Государственный стандарт Российской Федерации. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 185 с.

2. Лурье, А.И. Аналитическая механика. – М.: Физматгиз, 1961. – 824 с.: ил.

## СОДЕРЖАНИЕ

### УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТОТЕХНИКА

<i>R. Stetter, O. Prokopenya, K. Kozlovich</i> The problem of mobile robots movement control .....	4
<i>Здор Г.Н., Новичихина Е.Р.</i> Автоматизация создания моделирующих систем для производственных участков и линий .....	7
<i>Гулай А.В., Зайцев В.М.</i> Повышение достоверности передачи транзакций в мехатронных системах .....	8
<i>Лозовский В.Э., Мацукевич В.Ю., Лившиц Ю.Е.</i> Разработка алгоритма определения положения керамической плитки при ее движении по конвейеру .....	11
<i>Швед А.А., Здор Г.Н.</i> Автоматизированная система управления зерноочистительно-сушильного комплекса .....	14
<i>Овцов С.А., Карпович Д.С., Сарока В.В.</i> Математическая модель процесса подъема подвески автооператора для гальванических линий грузоподъемностью до 250 кг .....	17
<i>Суша О.Н., Карпович Д.С.</i> Методы исследования напряжения в круглых дисковых пилах .....	21
<i>Морозова М.П., Оробей И.О., Гринюк Д.А.</i> Подбор модели привода малоомощного двигателя постоянного тока при разгоне и торможении .....	24
<i>Сухорукова М. П., Шитик А.М., Оробей И.О., Гринюк Д.А.</i> Анализ критерия серии применительно к промышленным программируемым контроллерам .....	26
<i>Яршевич А.В.</i> Аналоговый вычислитель для автоматического управления компенсацией реактивной мощности .....	30
<i>Достовалова С.С., Заика С.В.</i> Сравнительный анализ технических характеристик бортовых систем охлаждения летательных аппаратов .....	33
<i>Новиков А.В., Угланов Д.А.</i> Оценка эффективности применения термоэлектрических генераторов в регазификаторах сжиженного природного газа .....	36
<i>Крюкова Д.Е., Благин Е.В., Угланов Д.А.</i> Оценка возможности получения дополнительной электроэнергии в комплексах на СПГ .....	39

**НАДЕЖНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
КОНСТРУКЦИИ МАШИН. ИННОВАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

<i>Рудь В.Д., Самчук Л.М., Гулиева Н.М., Зубовецька Н.Т.</i> Инновационное развитие ресурсосберегающих технологий по созданию новых материалов .....	43
<i>Омесь Д.В., Драган А.В.</i> Вейвлет-анализ сигналов в виброакустической диагностике .....	46
<i>Медведев О.А.</i> Обоснование точности регулирования замыкающих звеньев сборочных размерных цепей компенсаторами – членами геометрического ряда .....	48
<i>Миширук О.М., Горбунов В.П.</i> Оценка влияния тепловых деформаций передачи винт-гайка качения многоцелевого станка с ЧПУ на точность координатных перемещений .....	52
<i>Девойно О.Г., Лапковский А.С., Луцко Н.И.</i> Сварка листовых заготовок из оцинкованной и нержавеющей стали с использованием излучения оптоволоконного лазера.....	55
<i>Мойсейчик А.Е.</i> Пассивный неразрушающий контроль стальных конструкций с использованием деформационного теплообразования.....	58
<i>Доминикевич В.В., Веремей П.В., Левков К.Л.</i> Быстрое прототипирование сложнопрофильных деталей с применением LOM-технологии .....	60
<i>Щербаков В.Г.</i> Боросодержащий сплав для индукционной наплавки из диффузионно-легированных металлических отходов дробеструйной обработки.....	63
<i>Щербаков В.Г., Чугаев П.С.</i> Влияние предварительного диффузионного легирования в подвижной порошковой среде на технологические свойства медных волокон.....	66
<i>Саханько С.А., Рулько Н.Н., Нерода М.В.</i> Влияние состава насыщающей среды на свойства упрочненного слоя деталей машин в процессе ионно-плазменного азотирования.....	69
<i>Цуран В.В.</i> Расчет траектории шлифования режущей кромки геликоидального рубильного ножа. Разрешающее уравнение .....	72
<i>Черноус Д.А., Шимановский А.О.</i> Особенности расчета уровня шума для полимерных деталей машин.....	76

<b>Барсуков В.Г., Грахольская Е.В., Ховатов П.А., Комар О.В.</b> Оценка влияния дополнительной опоры на деформацию изгиба червяка экструдера .....	80
<b>Чикова Т.С., Ховатов П.А.</b> Возможности оценки дислокационных параметров сдвойникованной области металла методом сканирования поверхности .....	82
<b>Наскевич В.Ю., Казьмин А.А., Мишкель Е.В.</b> Оптимизация технологии фрезерования кулачков токарного патрона .....	85
<b>Рубаник В.В., Багрец Д.А., Новиков В.Ю.</b> Исследование процесса волочения проволоки никелида титана с нанесенным барьерным слоем нитрида титана .....	88
<b>Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Лесота А.В.</b> Контроль протяженных TiNi изделий из сплава с памятью формы .....	91
<b>Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Непомнящая В.В.</b> Запорный клапан с TiNi исполнительным элементом .....	93
<b>Рудь В.Д., Шыберко В.В., Повстаной А.Ю.</b> Особенности заполнения пресс-форм частицами неизометрической формы .....	97
<b>Некрасова С.О., Довгялло А.И.</b> Бортовые термоакустические криогенные установки .....	100
<b>Некрасова С.О., Довгялло А.И.</b> Термоакустические двигатели и энергетические установки в бортовых комплексах космических аппаратов .....	102
<b>Довгялло А.И., Благин Е.В., Лукашева М.В., Некрасова С.О., Угланов Д.А.</b> Расчёт и оптимизация параметров термоакустического пульсационного охладителя с помощью численного моделирования .....	105
<b>Парфиевич А.Н., Драган А.В.</b> Кепстральный анализ как способ повышения информативности акустической диагностики .....	107
<b>Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Лёгкоступов С.А., Денисенко В.Л., Матвеев К.С.</b> Колоноскопический TiNi стент .....	111
<b>Акулич А.П., Акулич Я.А.</b> Исследование величин оптимальной шероховатости поверхностей пар трения .....	113
<b>Монтик С.В., Головач А.П.</b> Механотермическое формирование комбинированных зубков породоразрушающего инструмента .....	116
<b>Григорьев В.Ф., Дакало Ю.А.</b> Экономические аспекты технологии зубообработки .....	119

*Сечко Д.С., Григорьев В.Ф.*  
Точность весовых дозирующих систем непрерывного действия ..... 122

*Ялковский Н.С.*  
Износостойкость плазменных покрытий из оксидной керамики в условиях гидроабразивного воздействия ..... 125

*Добрянин Ю.А.*  
Технологическая наследственность и ее опытное обоснование для образцов из стали ХВГ ..... 127

*Рубаник В.В., Луцко В.Ф., Шурмелевич Д.Д., Попова О.С.*  
Ультразвуковой однокорпусной завариватель магистралей контейнеров переливания крови ..... 131

*Саливончик Ю.Н., Сокол В.А.*  
Диагностика состояния режущего состояния инструмента в процессе обработки ... 134

*Голуб В.М.*  
Исследование и теоретические основы расчета параметров уплотнительных Устройств валов гидромашин ..... 138

## **ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И НАПРЯЖЕНИЙ**

*Тарасюк В., Крунич Б., Барсуков В.В.*  
Механизмы и закономерности изнашивания форм для производства силикатного кирпича ..... 144

*Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Луцко Н.И., Лапковский А.С.*  
Взаимосвязь скорости лазерной наплавки и распределения элементов в композиционном полосчатом покрытии из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01 ..... 146

*Шелег В.К., Белоцерковский М.А., Коновалова Е.Ф., Леванцевич М.А.*  
Оценка возможности использования метода деформационного плакирования в технологиях газотермического напыления ..... 150

*Лешик С.Д., Зноско К.Ф., Шупан П.И., Волков И.А.*  
Получение наночастиц методом импульсной лазерной абляции политетрафторэтилена в жидкости и исследование их размерных характеристик ... 153

*Овчинников Е.В., Струк В.А., Зноско К.Ф., Эйсымонт Е.И.*  
Морфологические особенности полимерных материалов, подвергнутых воздействию лазерного излучения ..... 156

*Ширвель П.И., Куликов И.С.*  
Численное моделирование неосесимметричного деформирования при нагреве и облучении ..... 159

<b>Веремейчик А.И., Гарбачевский В.В., Сазонов М.И., Хвасевич В.М., Цыганов Д.Л.</b> Нестационарный термостатический анализ при поверхностной плазменной закалке рабочей зоны пробивного пуансона .....	162
<b>Ширвель П.И., Чигарев А.В.</b> НДС неравномерно нагретых цилиндрических тел при ползучести и облучении .....	165
<b>Хвасевич В.М., Веремейчик А.И., Гарбачевский В.В., Мороз Е.А.</b> Оссимметричное термоупругое деформирование цилиндрических тел при нагреве и облучении .....	168
<b>Сазонов М.И., Веремейчик А.И.</b> Интенсификация теплообмена развитым турбулентным потоком плазмы .....	171
<b>Бартош Д.В., Сазонов М.И., Хвасевич В.М., Черноиван Н.В.</b> Исследование микроструктуры стали Х12М .....	174
<b>Галшлеев А.Г., Веремей П.В., Лапковский А.С.</b> Влияние лазерной сканирующей обработки на структурно-фазовый состав и микротвердость твердых сплавов ВК8, Т15К6 и Т5К10 .....	177
<b>Дашкевич В.Г., Пивоварчик А.А., Щербаков В.Г.</b> Особенности плавления диффузионно-легированных материалов в результате воздействия электрической дуги .....	180
<b>Мелешко И.Н., Пронкевич С.А.</b> Численно-аналитическое решение контактной задачи для тел с согласованными цилиндрическими поверхностями .....	183
<b>Пронкевич С.А.</b> Численный анализ влияния перфорации на потерю устойчивости прямоугольных пластин .....	186
<b>Константинов В.М., Ковальчук А.В.</b> Оценка и контроль свойств КОМПОЗИТОВ с PVD/CVD покрытием .....	188
<b>Мешкова В.В., Кардаполова М.А., Луцко Н.И.</b> Изучение физико-механических свойств покрытий из порошков на основе титана, полученных методом лазерной обработки .....	191
<b>Батрак В.В., Сазонов М.И., Хвасевич В.М., Черноиван Н.В.</b> Повышение ресурса работы установки для переработки древесных отходов .....	193
<b>Али М. Абед Аль-Зобайде</b> Расчет и проектирование слоистых конструкций с заданными теплопроводными свойствами .....	196

<b>Али М. Абед Аль-Зобайде</b> Выбор модели сервера на основе моделирования конвективного теплообмена в серверном ящике .....	199
<b>Веремей П.В., Кукин С.Ф., Девойно О.Г.</b> Влияние технологических режимов лазерной поверхностной закалки на микрогеометрию закаленных слоёв высокопрочного чугуна ВЧ50 .....	202
<b>Дашкевич В.Г. , Пивоварчик А.А.</b> Влияния структуры и фазового состава диффузионного борсодержащего слоя на его растворение при воздействии концентрированными потоками энергии .....	203
<b>Онысько С.Р., Хвисевич В.М., Чекан Н.М., Акула И.П.</b> Исследование износостойкости нанокристаллических покрытий на штамповой оснастке .....	205
<b>Холодарь Б.Г.</b> Продольные напряжения в адгезионном покрытии стержня .....	208

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

<b>Иванов В.П., Уваров Г.А.</b> Совершенствование инструментального диагностирования автомобильных двигателей .....	213
<b>Андруш В.Г.</b> Стендовая обкатка двигателей с заданием ее режимов по мощности Механических потерь .....	216
<b>Кастрюк А.П., Вигерина Т.В.</b> Упрочнение шеек коленчатых валов при их восстановлении наплавкой .....	219
<b>Довгялло А.И., Угланов Д.А., Цапкова А.Б., Шиманов А.А.</b> Возможность использования низкотемпературной энергетической установки для заправки автомобилей .....	221
<b>Монтик С. В. , Санюкевич Ф.М.</b> Сравнительный анализ методик моделирования средств обслуживания автомобилей .....	224
<b>Концевич П.С., Головченко Ю.А.</b> Использование имитационного моделирования для оптимизации зон технического обслуживания автотранспортных предприятий .....	227

**Семенов И.Н., Березуцкая С.О.**

Методика нормирования трудоемкости противокоррозионной  
обработки кузова легкового автомобиля в технологическом проектировании  
организации автосервиса..... 229

**Волощук А.А.**

Тормозной механизм передних колес трактора..... 230

Научное издание

# **НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

**Материалы Международной научно-технической  
конференции**

**29-30 октября**

Текст печатается в авторской редакции

Ответственный за выпуск: **О.Н. Прокопеня**

Редактор: **Е.А. Боровикова**

Корректор: **Е.В. Никитчик**

Компьютерная верстка: **Е.А. Боровикова, А.П. Соколюк**

ISBN 978-985-493-312-2



9 789854 933122

Издательство БрГТУ.

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных  
изданий № 1/235 от 24.03.2014 г.

Подписано к печати 27.10.2014 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага «Снегурочка». Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 15,0. Заказ № 882.

Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе учреждения  
образования «Брестский государственный  
технический университет».

224017, г. Брест, ул. Московская, 267.