

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА
AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Феоктистов С. И., Чжо Зяяр Со
S. I. Feoktistov, Kyaw Zayar Soe

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТИТАНОВЫХ
И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ РАЗДАЧЕ**

**DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF TITANIUM
AND ALUMINUM ALLOYS AT DISTRIBUTION**

Феоктистов Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, декан самолётостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ssf@knastu.ru.

Mr. Sergey I. Feoktistov – Doctor of Engineering, Professor, Dean of the faculty of aircraft of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ssf@knastu.ru.

Чжо Зяяр Со – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kyaw-zayarsoe52@gmail.com.

Mr. Kyaw Zayar Soe – post-graduate student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kyawzayar-soe52@gmail.com.

Аннотация. Разработан метод определения предельного коэффициента раздачи для титановых и алюминиевых сплавов, позволяющий достаточно точно определять момент разрушения заготовки. Метод основан на использовании диаграмм предельного формоизменения (Forming Limit Diagram – FLD) при прогнозировании разрушения заготовки, а также на использовании метода переменных параметров упругости при определении напряжённо-деформированного состояния в процессе раздачи.

Summary. The paper describes a method, which has been developed, for obtaining the limiting expanding ratio of titanium and aluminum alloys and determines the moment of failure of the workpiece. This method is based not only on the use of Forming Limit Diagram (FLD) in predicting the failure of the blank, but also on the using method of variable parameters of elasticity in determining the stress-strain state in expanding process.

Ключевые слова: FLD-диаграмма, диаграмма предельного формоизменения, раздача, метод переменных параметров упругости, технологические возможности.

Key words: FLD-diagram, forming limit diagram, expanding, method of variable parameters of elasticity, technological capabilities.

УДК 621.73.01/07.002

Введение

Одной из важнейших задач при разработке технологического процесса листовой штамповки-раздачи является прогнозирование момента разрушения заготовки, то есть определение предельного коэффициента раздачи [2]. Современный уровень развития вычислительной техники, её доступность для инженерных расчётов при проектировании процессов листовой штамповки позволяют с высокой точностью рассчитывать параметры напряжённо-деформированного состояния заготовки. Это даёт возможность прогнозировать разрушение заготовки с помощью диаграмм предельного формоизменения (Forming Limit Diagram – FLD) [5; 11; 14; 7; 6; 10; 8].

Существует достаточно много способов получения диаграмм предельного формоизменения. Все они сводятся к достижению разрушения листового материала при различных предсказуемых или измеримых деформированных состояниях. Наиболее распространены методы Наказимы (K. Nakazima) [13] и Марчиньяка (Z. Marciniak) [12].

В нашей работе предлагается простой аналитический способ построения FLD-диаграммы с использованием справочных механических характеристик металла, основанный на математической модели разрушения бездефектных листовых изотропных заготовок.

При определении напряжённо-деформированного состояния используется метод переменных параметров упругости, позволяющий учитывать не только изменение толщины в процессе деформирования, но и упрочнение материала, которое для титановых и алюминиевых сплавов хорошо описывается степенной функцией.

Модель разрушения бездефектных листовых изотропных заготовок на основе геометрического критерия

При построении модели разрушения бездефектных листовых изотропных заготовок в качестве критерия предельного деформирования используется геометрический критерий локализации деформации, предсказывающий локальное интенсивное утонение заготовки, математическая запись которого имеет вид $\frac{dS}{d\rho} = \pm\infty$, где dS – изменение толщины стенки заготовки по её длине H

в направлении действия наибольшего растягивающего напряжения.

Рассматривается процесс формоизменения листовой заготовки под действием хотя бы одного растягивающего напряжения (σ_1), действующего в плоскости листа при условии, что ширина заготовки по её длине H постоянная ($dl/dH = 0$), а заготовка может иметь исходную разнотолщинность $S_c = \varphi(H_c)$.

Решение этой задачи представлено в работах А. С. Чумадина [4].

Для случая монотонного деформирования бездефектных (равнотолщинных) заготовок математическая модель предельного деформирования имеет вид

$$D \frac{\sigma_1}{S} - \sigma_1 C (2\sigma_2 - \sigma_1) + \frac{4\sigma_s^2 n (2e_3 + e_2)}{3S e_i^2} = 0, \quad (1)$$

где

$$C = \frac{3e_2}{(-2e_3 - e_2)^2}; D = (2\sigma_1 - \sigma_2) + B(2\sigma_2 - \sigma_1);$$

$$\sigma_1 = +\sqrt{\frac{\sigma_s^2}{(B)^2 - B + 1}}; \sigma_2 = \pm\sqrt{\frac{\sigma_s^2 (B)^2}{(B)^2 - B + 1}}; B = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}.$$

В этих уравнениях главные логарифмические деформаций равны:

$$e_1 = \ln \frac{dH}{dH_c}; e_2 = \ln \frac{L}{L_c}; e_3 = \ln \frac{S}{S_c},$$

где S_c, L_c – соответственно начальная толщина и ширина заготовки на длине H_c , S, L – то же на длине H в момент начала разрушения (образования шейки).

Для преобразования уравнения (1) используем основные физические зависимости, связывающие главные напряжения и главные деформации:

1) уравнение, описывающее состояния материала (кривая деформационного упрочнения) [1] в виде $\sigma_s = A e_i^n$, где A, n – константы материала; e_i – интенсивность логарифмических деформации, причём $e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_1 e_2 + e_2^2}$;

2) энергетическое условие пластичности: $\sigma_s^2 = \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2$, где σ_s – напряжение сопротивления деформированию; $\sigma_1\sigma_2$ – главные напряжения;

3) условие постоянства объёма в главных логарифмических деформациях: $e_1 + e_2 + e_3 = 0$;

4) уравнение связи напряжений и деформаций: $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{2e_2 + e_1}{2e_1 + e_2}$.

Выражая входящие в уравнение (1) величины через e_1 и e_2 , получим уравнение, описывающее кривую предельного формоизменения в координатах e_1 и e_2 :

$$2(e_1^2 + e_1 \cdot e_2 + e_2^2)(2e_1 + e_2) - 3e_2^2 - n(2e_1 + e_2)^2 = 0. \quad (2)$$

В уравнении (2) n – показатель степени, описывающий кривую деформационного упрочнения. Из [4; 3] известно, что если кривая упрочнения аппроксимируется степенной функцией, то для того чтобы эта аппроксимация удовлетворяла свойству кривых упрочнения 3-го рода, необходимо соблюдение условия $n = e_{ш}$, где $e_{ш}$ – истинная (логарифмическая) деформация, соответствующая моменту образования шейки (переход от распределённой деформации к сосредоточенной).

Определение напряжённо-деформированного состояния при раздаче

Представлена математическая модель процессов раздачи трубных заготовок с учётом изменения толщины. Предложенная методика позволяет исследовать процессы раздачи по криволинейной оправке с подпором, когда наблюдается значительное местное утолщение материала.

Широкое применение при изготовлении различных деталей и узлов летательных аппаратов нашли технологические процессы формоизменения трубчатых заготовок, такие как раздача, выворот внутрь и наружу. Эти процессы эффективны только с использованием термической интенсификации. Такие операции, как раздача, в случае использования подпора могут сопровождаться значительным местным утолщением материала.

При решении задачи напряжения и деформации осредняются по толщине и относятся к срединной поверхности, как в безмоментной теории оболочек.

Уравнения равновесия элемента трубчатой заготовки в проекциях на нормаль и касательную к срединной поверхности в соответствии с рис. 1 имеют вид

$$\frac{d}{d\rho}(\rho S \sigma_\rho \sin\psi) = -(q_n + q_\tau \operatorname{tg}\psi)\rho; \quad (3)$$

$$\frac{d}{d\rho}(\rho S \sigma_\rho) = \rho S \sigma_\varphi - \frac{q_\tau}{\cos\psi} \rho,$$

где S – средняя толщина рассматриваемого элемента; σ_ρ – радиальное напряжение; ψ – угол между касательной осью и ρ , отсчитываемый против часовой стрелки; q_n – проекция усилия на нормаль, направленную к центру кривизны; q_τ – проекция усилия на касательную, направленную в сторону увеличения ρ ; σ_φ – тангенциальное напряжение.

Для удобства можно угол ψ заменить углом α (см. рис. 1).

Если происходит раздача на конус, это будет угол конусности. Учитывая, что при раздаче $q_n = q$, $q_\tau = -\mu q$, $\psi = 270^\circ + \alpha$, систему (3) можно привести к одному уравнению в напряжениях:

$$\frac{d}{d\rho}(\rho S \sigma_\rho) = S \sigma_\varphi \frac{(1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha)}{\rho} - S \sigma_\rho \frac{(1 + \mu \frac{d\alpha}{d\rho})}{\rho}. \quad (4)$$

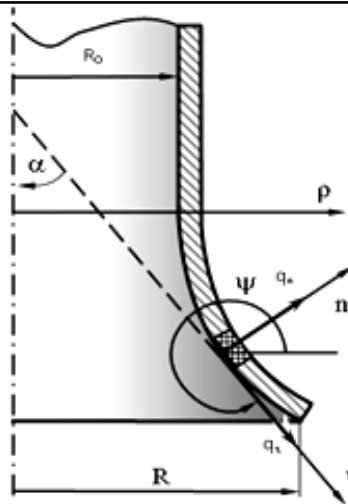


Рис. 1. Общий случай раздачи

Это уравнение описывает равновесие при раздаче.

Используя уравнение связи напряжений и деформаций в соответствии с гипотезами деформационной теории, получим интегральное уравнение равновесия в деформациях:

$$e_{\rho} = -\frac{1}{2}e_{\varphi} + \frac{3U(\rho)}{4SE_{\text{чек}}} \int_R^{\rho} \frac{SE_{\text{чек}}e_{\varphi}(1+\mu \cdot \text{ctg } \alpha)}{\rho U(\rho)} d\rho + \frac{E_{\text{чек}R}S_R}{E_{\text{чек}}S} (e_{\rho R} + \frac{1}{2}e_{\varphi R})U(\rho), \quad (5)$$

$$U(\rho) = \exp \left[-\int_R^{\rho} \frac{1-\mu \cdot \text{ctg } \alpha + 2\mu\rho \frac{d\alpha}{d\rho}}{2\rho} d\rho \right], \quad (6)$$

$$e_{\varphi} = \ln \frac{\rho}{R_0}. \quad (7)$$

При рассмотрении раздачи в конической матрице угол α равен углу конусности α_{κ} . Тогда уравнение (6) упрощается и принимает вид

$$U(\rho) = \exp \left[\frac{1-\mu \cdot \text{ctg } \alpha_{\kappa}}{2} \ln \frac{R}{\rho} \right]. \quad (8)$$

Определение технологических возможностей при раздаче

Кривую деформационного упрочнения титанового или алюминиевого сплава аппроксимируют степенной функцией в виде уравнения Холломона (J. Н. Hollomon) [9]: $\sigma_s = \sigma_{\text{шт}} \cdot (e_i / e_{\text{шт}})^{e_{\text{шт}}}$, где $\sigma_{\text{шт}} = \sigma_B \cdot \exp(e_{\text{шт}})$, а $e_{\text{шт}}$ – истинная (логарифмическая) деформация, соответствующая моменту образования шейки (переход от распределённой деформации к сосредоточенной) и σ_B – предел прочности материала (временное сопротивление при испытании на разрыв).

Технологический процесс раздачи задают следующими параметрами: R_0 – радиус заготовки; α_{κ} – угол конусности; μ – коэффициент трения и радиус наружного края R .

Наиболее полное представление о прохождении процесса раздачи даёт положение наружного края R , поэтому задают ещё шаг изменения положения наружного края ΔR .

При заданном положении наружного края при использовании метода переменных параметров упругости [1] определяют напряжённо-деформированное состояние фланца заготовки в следующем порядке:

1. В первом приближении принимают толщину заготовки постоянной и равной начальной толщине, а секущий модуль – равным модулю упругости; определив $U(\rho)$ и e_ϕ по формулам (6) и (7), подставляют полученные значения в (5) и численно решают интегральное уравнение для нахождения e_ϕ .

2. После определения деформированного состояния находят напряжённое состояние и уточняют значения толщины и секущего модуля, затем расчёт повторяют снова до тех пор, пока значение секущего модуля последующего приближения не будет достаточно близко к предыдущему. Как показали расчёты, метод обладает хорошей сходимостью процесса последовательных приближений.

3. Затем, принимая $e_p = e_1$, а $e_\phi = e_2$, определяют положение точек, характеризующих деформированное состояние фланца в координатах e_1, e_2 . Если все эти точки лежат ниже кривой предельного формоизменения, определяемой уравнением (2), то процесс продолжают, изменяя положение наружного края R . В случае если на каком-либо этапе нагружения одна из точек, характеризующих деформированное состояние фланца в координатах e_1, e_2 , будет находиться выше диаграммы предельного формоизменения, то расчёт прекращают и определяют предельный коэффициент раздачи $K_{\text{раз}} = \frac{R_0}{R}$.

Результаты расчётов для материала ВТ1-1 представлены на рис. 1, где кривые 1, 2 характеризуют деформированное состояние заготовки в момент, предшествующий разрушению. Сплошная толстая линия соответствует кривой предельного формоизменения (FLC), построенной по уравнению (2).

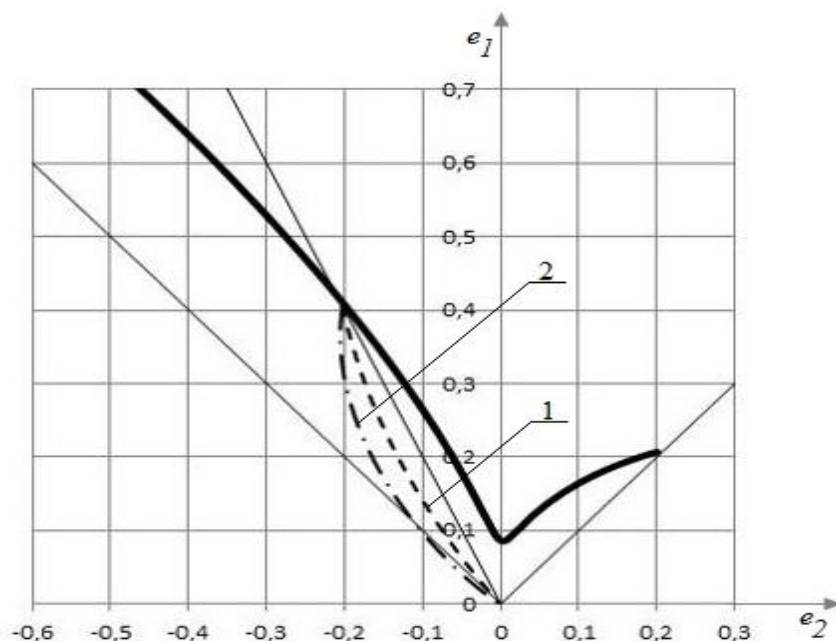


Рис. 1. Определение коэффициента раздачи для материала ВТ1-1 ($e_{\text{ин}} = 0,086$):
1 – без учёта трения ($K_{\text{раз}} = 0,67$); 2 – с учётом трения ($\mu = 0,3$), ($K_{\text{раз}} = 0,67$)

Вывод

В результате исследования получены методы определения технологических возможностей титановых и алюминиевых сплавов при раздаче, позволяющие прогнозировать разрушение заготовки по диаграмме предельного формоизменения (Forming Limit Diagram – FLD).

ЛИТЕРАТУРА

1. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для вузов / Н. Н. Малинин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
2. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
3. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
4. Чумадин, А. С. Теория и расчёты процессов листовой штамповки (для инженеров) / А. С. Чумадин. – М: Экспосервис «ВИП», 2014. – 216 с.
5. Banabic, D. Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation / D. Banabic. – London – New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010. – 301 p.
6. Chen, G. N. Damage, Instability and Construction of Forming Limit Curve in Sheet Metal Stretch Forming / G. N. Chen, S. G. Hu // J. Journal of Plasticity Engineering. – 1994. – Vol. 1. – P. 31-46.
7. Du, P. M. Theoretical prediction and parameter influence of FLDs based on M-K model / P. M. Du, L. H. Lang, B. S. Liu // J. Journal of Plasticity Engineering. – 2011. – Vol. 18. – P. 84-89.
8. Ghosh, A. K. The influence of strain hardening and strain-rate sensitivity on sheet metal forming [J] / A. K. Ghosh // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1977. – Vol. 99(3). – P. 264-274.
9. Hollomon, J. H. Tensile deformation, transaction of American Institute of Mechanical Engineering / J. H. Hollomon. – 1945. – Vol. 162. – P. 268-277.
10. Kami, A. Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage model / A. Kami, B. M. Dariani // J. Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 216. – P. 472-483.
11. Ma, G. S. Theoretical prediction of FLDs for Al-Li alloy at elevated temperature based on M-K model / G. S. Ma, M. Wan, X. D. Wu // Chinese Journal of Nonferrous Metals. – 2008. – Vol. 18. – P. 980-984.
12. Marciniak, Z. Limit strain in the process of stretch forming sheet metal / Z. Marciniak, K. Kuczynski // International Journal of Mechanical science. – 1967. – Vol. 9. – P. 609-620.
13. Nakazima, K. Forming Limits under biaxial stretching of sheet metals / K. Nakazima, T. Kikuma // Testu-to Hagane. – 1967. – Vol. 53. – P. 455-458.
14. Yang, M. The Forming Limit Prediction Using a Rate-Dependent Crystal Plasticity Model X.ch. Dong / M. Yang // J. Journal of ShangHai JiaoTong University. – 2008. – Vol. 42. – P. 720-723.

Иванов С. Н., Буньков Н. А., Горбунов А. В., Дадынский А. А.
S. N. Ivanov, N. A. Bunkov, A. V. Gorbunov, A. A. Dadynsky

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛОИНЕРЦИОННЫХ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ**

DESIGN FEATURES OF LOW-INERTIA ELECTROMECHANICAL DRIVES

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, professor of electromechanics Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

Буньков Николай Алексеевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Nikolai A. – student, electromechanics department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Горбунов Александр Владимирович – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Alexander V. Gorbunov – student, electromechanics department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Дадынский Алексей Алексеевич – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Mr. Aleksey A. Dadynsky – student, electromechanics department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kem@email.knastu.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются особенности проектирования малоинерционных электромеханических приводов на базе асинхронных двигателей с полым немагнитным ротором, предназначенных для использования в технических системах с повышенными динамическими характеристиками. Приведены результаты анализа существующих теоретических методов расчёта параметров полых роторов. Обоснована постановка задачи выбора конструктивных факторов применительно к объекту исследования. Рассмотрена физическая реализация электромеханических преобразователей и приведены рекомендации по их проектированию. Приведено описание и пример реализации экспериментальной установки для исследования варьируемых исполнений роторов. Установлены основные направления для обоснования выбора адаптированной методики проектирования. В статье показано, что данный класс устройств может проектироваться и исследоваться на основе классического электромеханического преобразователя переменного тока, но с учётом особенностей конструктивного исполнения короткозамкнутого полого ротора. Определены основные этапы разработки и установления соответствия между техническими характеристиками базовых электромеханических преобразователей и выходными параметрами малоинерционных электромеханических приводов на базе асинхронных двигателей с полым немагнитным ротором.

Summary. The article deals with the design features of low-inertia electromechanical drives based on asynchronous motors with a hollow non-magnetic rotor, designed for use in technical systems with high dynamic characteristics. The results of the analysis of existing theoretical methods for calculating the parameters of hollow rotors are presented. The statement of a problem of the choice of constructive factors in relation to object of research

is proved. Physical realization of electromechanical transducers is considered and recommendations on its design are given. The description and an example of the experimental setup for the study of variable rotor designs are given. The main directions for justification of the choice of the adapted design technique are established. The article shows that this class of devices can be designed and studied on the basis of the classical electromechanical AC converter, but taking into account the design features of the short-circuited hollow rotor. The main stages of development and establishment of correspondence between technical characteristics of basic electromechanical converters and output parameters of low-inertia electromechanical drives based on asynchronous motors with hollow non-magnetic rotor are determined.

Ключевые слова: проектирование, малоинерционный электромеханический привод, полый немагнитный ротор.

Key words: design, low-inertia electromechanical drive, hollow non-magnetic rotor.

УДК 621.31: 621.25

Введение

В современных технических комплексах максимальное применение находят приводные устройства на основе управляемых электромеханических преобразователей [5; 6; 4]. При этом следует отметить, что в связи с широким использованием в электротехнических комплексах информационных управляющих систем разработка маломощных приводов с высокими динамическими параметрами является актуальной задачей. Предварительный анализ известных подходов к проектированию малоинерционных электромеханических приводов на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей с полым немагнитным ротором (МЭП) показывает, что использование существующих методик не учитывает ряд их принципиальных конструктивных особенностей, что свидетельствует о невысокой эффективности таких приводов.

В работе [3] показано, что основной проблемой, возникающей на этапе обоснования размерных и конструктивных соотношений полого немагнитного ротора, является сложный характер распределения электромагнитных и, как следствие, тепловых полей в полом роторе, что не позволяет получить адаптированные проектные методики. Следует отметить, что вопросы обоснованного выбора проектных параметров возникают при расчёте стандартных электромеханических преобразователей [10]. В частности, методика определения обмоточных данных короткозамкнутых роторов в виде стержневой конструкции, приведённой на рис. 1, допускает различное соотношение между числом пазов статора и ротора [7].

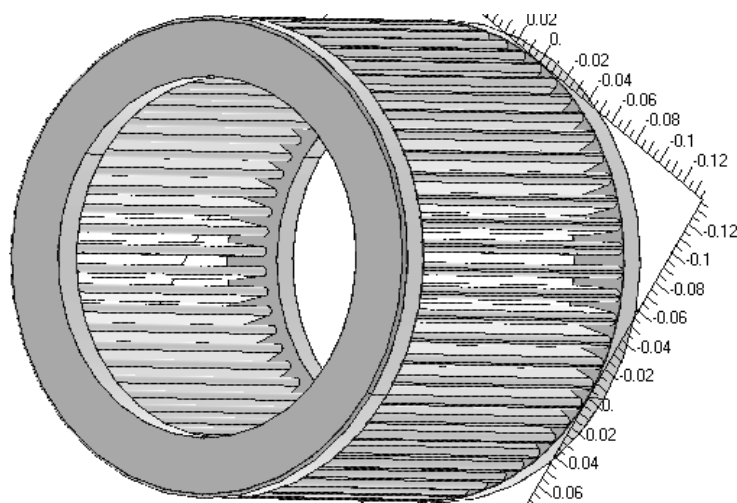


Рис. 1. Короткозамкнутая обмотка асинхронного двигателя

Постановка задачи исследования

Теоретической основой проектирования МЭП на начальном этапе является известный аналитический алгоритм, предложенный в [8]. В качестве исходных данных при проектировании полого немагнитного ротора выбираются удельное электрическое сопротивление материала ротора при рабочей температуре ρ (например, алюминий марки А5 ГОСТ 11069-2001¹ $\rho_{Al;100} = 0,392 \cdot 10^{-7}$ Ом·м) и его размерные соотношения, м: наружный диаметр D , осевая длина l и толщина стенки полого ротора Δ .

При технологически детерминированной величине воздушного зазора δ_0 внешний диаметр D рассчитывается исходя из внутреннего диаметра статора, уменьшенного на величину двухстороннего зазора δ_0 . Длина l ротора может быть принята на 10...12 % больше, чем длина пакета магнитопровода (стали) статора ($l \approx 1,10...1,12 l_{ст}$). Толщина стенки полого ротора определяется номенклатурой сортамента заготовок, используемых для изготовления ротора в соответствии с ГОСТ 18475-82 «Трубы холоднодеформированные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия».

Активное сопротивление полого ротора r , приведённое к обмотке фазы статора, Ом:

$$r = \frac{4m \cdot \rho \cdot l \cdot w^2 \cdot k_{обм}^2 \cdot k_r}{\pi \cdot D \cdot l},$$

где m – число фаз обмотки статора; $w, k_{обм}$ – число витков и обмоточный коэффициент обмотки статора; k_r – эмпирический коэффициент, учитывающий распределение тока в полом роторе.

При питании обмотки статора от источника промышленной частоты индуктивное сопротивление рассеяния маловиткового полого ротора принимается равным нулю.

Сопротивление взаимоиנדукции статора и ротора, Ом:

$$x = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot w^2 \cdot k_{обм}^2 \cdot D_1 \cdot l \cdot f}{k_{\mu} \cdot k_{\delta} \cdot \delta \cdot p^2},$$

где k_{μ} – коэффициент насыщения магнитной цепи; k_{δ} – коэффициент воздушного зазора; p – число пар полюсов.

Для сравнения можно отметить, что для расчёта активного сопротивления короткозамкнутого ротора с «беличьей» клеткой r_2 используется формула для расчёта активного сопротивления обмотки статора, хотя конструктивно они существенно отличаются, что делает выбор числа фаз и проводников ротора неоднозначным.

Это же имеет место и при дальнейшем приведении параметров короткозамкнутого ротора с использованием в практике проектирования промышленных асинхронных электродвигателей выражения:

$$r_2' = r_2 \frac{4m \cdot w^2 \cdot k_{обм}^2}{Z_2 \cdot k_{ск}^2},$$

где r_2 – активное сопротивление короткозамкнутого ротора; Z_2 – количество зубцов (пазов) ротора; $k_{ск}$ – коэффициент скоса.

Данные выражения показывают, что очевидным недостатком существующего подхода [8] является существенное упрощение научной задачи, в то же время её решение с учётом конструктивных особенностей малоинерционных электромеханических приводов является одним из направлений повышения их эффективности на этапе проектирования.

¹ ГОСТ 11069-2001 «Алюминий первичный. Марки»

Отмеченные особенности могут быть учтены за счёт анализа и развития теоретических и экспериментальных исследований, нашедших отражение в фундаментальных работах, в различной степени касающихся рассматриваемых вопросов [8; 1; 2].

Аналитические методы исследования асинхронных двигателей с полым ротором связаны с гипотезами о распределении вихревого тока в роторе или с решением задач о распределении поля и вихревого тока. Например, расчёты в работе [8] проведены в предположении о том, что токи ротора ориентированы параллельно оси статора, а полный ток замкнут в элементах ротора, выступающих за длину пакета статора (как в короткозамкнутых кольцах).

Для плоской магнитной системы («стоячая волна» тока статора) и массивного ротора из ферромагнитного материала И. С. Бруком найдено распределение вихревых токов [1]. Для двигателей с полым немагнитным ротором без учёта влияния краевых эффектов в роторе эта задача была решена в 1946 году.

И. А. Вевюрко предложил принять для ротора ограниченной длины радиальную составляющую напряжённости магнитного поля и плотность вихревого тока по толщине цилиндра постоянными [2].

В ряде работ ротор представлен сложной структурой и эквивалентной схемой замещения, составленной из простых конфигураций, для которых из условия минимального пути протекания вихревого тока достаточно просто определить отдельные сопротивления ротора. Однако эти гипотезы дают очень низкую точность расчёта сопротивления ротора.

Аналитическое определение параметров полого ротора в виде решения полевой задачи приведено С. В. Поклоновым [9]. Но и в этой работе приняты существенные допущения (вне осевой длины воздушного зазора отсутствует магнитная связь между статором и ротором, то есть в лобовых частях ротора индукция равна нулю; по длине зазора поле равномерно и ограничено неизменной по толщине нормальной компонентой; расчёт проводится для синусоидального поля и т. п.).

Для аналитических методов сформировалась общая последовательность вычислительных операций. Первоначально система разбивается на характеристические области – занятые током ротора и зоны воздушных зазоров. Далее для обобщения поля в бестоковой и токовой областях вводится векторный магнитный потенциал и для каждой области составляются уравнения Максвелла, причём для бестоковых областей последние сводятся к уравнениям Лапласа, для области вихревых токов – Пуассона. Решение этих уравнений позволяет для каждой области найти векторный потенциал, а далее – плотность вихревого тока. Нахождение действительной части вектора Пойтинга позволяет определить активные потери в роторе, дальнейший переход от выражений, полученных для «стоячей волны» к вращающемуся полю «бегущей волны». По приведённому току ротора и электрическим потерям определяется приведённое к числу витков обмотки и фаз статора активное сопротивление.

Однако аналитические методики, полученные при существенных допущениях и упрощениях физической картины электромагнитных взаимодействий в расчётных областях, дают существенное расхождение теоретических результатов с экспериментальными данными при различных конструктивных особенностях и режимах работы двигателя.

Более того, сканирование номинальных параметров МЭП аппаратными средствами при общепринятых допущениях не позволяет установить существенного влияния полого немагнитного ротора на процессы преобразования мощности (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры рабочего режима

Параметр	Статор	Статор – полый ротор
Активное сопротивление обмотки статора, Ом	6,07238	6,07238
Индуктивность обмотки статора, мГн	17,625	17,625
Приведённое вторичное активное сопротивление, Ом	4,0625	4,0625

Приведённая вторичная индуктивность, мГн	18,125	18,125
Взаимная индуктивность, мГн	586,0	586,0
Суммарное активное сопротивление статора, Ом	14,5737	14,5737

Развитие современных информационных технологий позволяет провести анализ возможных подходов решения рассматриваемой задачи методами имитационного моделирования с использованием пакета Ansys Maxwell, как это сделано в [3]. Хотя такой вариант представляет самостоятельное научное направление, требующее отдельного рассмотрения, но даже предварительные результаты показывают, что для их верификации необходима экспериментальная проверка.

Физическое моделирование процессов электромагнитного преобразования энергии применительно к МЭП сводится к двум подзадачам. Первая сводится к проверке теоретических гипотез, адекватности математических моделей и полученных аналитических результатов, вторая – к поиску субоптимальных проектных параметров и разработке новых направлений решения рассматриваемой задачи. В качестве физической модели использован трёхфазный асинхронный электродвигатель со сменным ротором (см. рис. 2).



Рис. 2. Физическая модель МЭП

Заключение

В статье проведён анализ основных подходов, позволяющих учесть конструктивные особенности малоинерционных электродвигателей при проектировании. Полученные результаты являются основой для создания автоматизированных систем проектирования и определения основных путей совершенствования МЭП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брук, И. С. Теория асинхронного двигателя с массивным ротором / И. С. Брук // Вестник экспериментальной и теоретической электротехники. – 1929. – № 5. – С. 175-193.
2. Вевюрко, И. А. О расчёте асинхронной машины с полым ротором методом симметричных составляющих / И. А. Вевюрко // Вестник промышленности. – 1958. – № 5. – С. 28-32.
3. Анализ влияния конструкционных факторов на надёжность герметичных электромеханических преобразователей / Д. А. Голоколос, Н. С. Карпова, С. Н. Иванов, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № I-4(16). – С. 29-34.
4. Иванов, С. Н. Теплогенерирующие электромеханические устройства и комплексы / С. Н. Иванов, К. К. Ким, В. М. Кузьмин. – СПб.: Изд-во «ОМ-Пресс», 2009. – 347 с.
5. Ким, К. К. Рыхление смёрзшегося угля электрогидравлическим методом / К. К. Ким, М. А. Шпилев // Мир транспорта. – 2013. – Т. 11. – № 2(46). – С. 48-55.

6. Ким, К. К. Модель взаимодействия токоприёмника с контактным проводом / К. К. Ким, Ю. А. Антонов // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 4. – С. 9-12.
7. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов. – М.: Изд-во «Юрайт», 2016. – 767 с.
8. Лопухина, Е. М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики / Е. М. Лопухина. – М.: Высшая школа, 1980. – 328 с.
9. Поклонов, С. В. Асинхронные двигатели герметичных электронасосов / С. В. Поклонов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. – 64 с.
10. Уайт, Д. Электромеханическое преобразование энергии / Д. Уайт, Г. Вудсон. – М.: Энергия, 1964. – 528 с.

Соловьев В. А., Попова В. С.
V. A. Solovyev, V. S. Popova

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА ПРОВОДАХ ЛЭП

EXPERT ASSESSMENT OF ICE EDUCATION PARAMETERS

Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav A. Solovyev – Dr. habil. in Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

Попова Валерия Сергеевна – аспирантка Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: valeriya_guzhvina@mail.ru.

Mrs. Valeriya S. Popova – Postgraduate, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: valeriya_guzhvina@mail.ru.

Аннотация. В статье приведены статистические данные измерений гололедообразования на гололедном станке, установленном на метеостанции Братолюбовка; проведён анализ этих данных, получена экспертная оценка влияния того или иного параметра на процесс гололедообразования.

Summary. The article presents statistical data for measuring icing on an icing machine installed at the Bratolyubovka meteorological station, analyzes these data, and obtains an expert assessment of the effect of various parameters on the process of icing.

Ключевые слова: прогнозирование, интеллектуальная система, гололедообразование, ЛЭП, нечёткая идентификация.

Key words: prediction, intellectual system, icing, power lines, fuzzy identification.

УДК 004.942

Важную роль при построении системы удаления гололёда с проводов линий электропередач (ЛЭП) играет своевременное определение массы отложившегося льда, время начала процесса ледоудаления.

На сегодняшний день существует большое количество систем удаления гололёда с проводов ЛЭП [1; 7; 8; 9; 10; 11]. Исследованием процесса гололедообразования и разработкой средств борьбы со льдом на проводах ЛЭП занимаются российские и зарубежные учёные. Например, коллектив Уфимского авиационного университета работает в области создания перспективных технических решений по обеспечению качественного и надёжного электроснабжения потребителей во время гололедообразования на проводах ВЛ. Была разработана и внедрена в эксплуатацию система контроля гололедно-ветровых нагрузок на проводах и грозозащитных тросах воздушных линий (ВЛ) [14; 15]. Коллектив Саратовского технического университета занимается разработкой алгоритмов работы системы мониторинга гололедообразования для воздушных линий электропередачи и контактной подвески электротяговых сетей в соответствии с их специфическими особенностями. Предложены термодинамический способ мониторинга интенсивности гололедообразования, варианты технической реализации и алгоритмы функционирования системы мониторинга интенсивности гололедообразования для использования её на ВЛ и КС [12; 13].

Тем не менее на сегодняшний день имеющиеся системы мониторинга позволяют оперировать только по фактической величине гололёда на проводах ЛЭП, что не позволяет выбрать рациональное время включения системы гололедоудаления, а при высокой интенсивности гололедообразования не исключает возникновения аварийных ситуаций.

Кроме того, анализируемые системы мониторинга при оценке величины гололедообразования оперируют набором так называемых «основных параметров», исключая из рассмотрения целый ряд синоптических, геофизических и метеорологических факторов [2; 3].

Одним из путей, устраняющих вышеизложенные недостатки систем мониторинга, является путь, направленный на наделение их функцией прогнозирования гололедообразования.

В настоящее время прогнозирующие системы широко применяются в науке и технике. Существуют адаптивные прогнозирующие системы управления полётом, системы прогнозирования ледообразования для авиационной техники, системы прогнозирующего нейрорегулирования нелинейными динамическими объектами, прогнозирующие инверсное нейрорегулирование в условиях возмущений для позиционно-следающего пневмопривода и т. д. [4;5].

Заблаговременное прогнозирование даёт возможность проводить упреждающие мероприятия по удалению льда, позволяет снизить энергозатраты, обеспечивает проведение профилактических мероприятий, даёт запас времени на предотвращение аварии, то есть позволяет проводить планирование противогололедных мероприятий в масштабах всей сети энергоснабжения.

Созданию моделей гололедообразования посвящена работа [6], но приведённые в ней модели гололедообразования довольно просты и не учитывают всех факторов, влияющих на гололедообразование, причём выборка факторов производилась условно.

Следует отметить, что в технической литературе имеются отрывочные попытки провести оценку влияния того или иного фактора на процесс гололедообразования. К примеру, в [2] приводится оценка влияния на гололедообразование таких факторов, как температура воздуха, влажность, скорость, направление ветра и т. д., однако оценка проводится на основании недостаточного количества данных, что в итоге не позволяет разработать адекватное математическое описание процесса гололедообразования. Поэтому целью настоящей статьи является оценка влияния того или иного фактора на гололедообразование.

Анализ проводился на основе статистических данных, предоставленных Дальневосточным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

В качестве примера ниже приводится выборка измерений гололедообразования на гололедном станке, установленном на метеостанции «Братолюбовка», при этом выбраны случаи отложений на проводах диаметром более 5 мм за последние 10 лет.

В качестве измеряемых параметров, в той или иной степени влияющих на процесс гололедообразования, использовались: вид отложения, время начала нарастания отложения, продолжительность стадии нарастания, продолжительность случая нарастания отложения, температура воздуха в начале нарастания отложения, температура воздуха при достижении отложением максимального диаметра, скорость и направление ветра в начале нарастания отложения, скорость и направление ветра при достижении отложением максимального диаметра, диаметр отложения, толщина отложения, день начала случая отложения, температура поверхности почвы, температура точки росы, относительная влажность, атмосферное давление на уровне станции, атмосферное давление на уровне моря, облачность (в том числе формы облаков), погода (в том числе наличие и вид осадков).

Сводная таблица метеорологических данных приведена на рис. 1 и 2, где

S – шифр вида отложения (13 – кристаллическая изморось, 14 – зернистая изморось, 16 – гололёд);

T_{nach} – время начала нарастания отложения, час;

$Pr1$ – продолжительность стадии нарастания, час;

$Pr2$ – продолжительность случая нарастания отложения, час;

t_{nach} – температура воздуха в начале нарастания отложения, °С;

N_{nach} – направление ветра в начале нарастания отложения, град;

v_{nach} – скорость ветра в начале нарастания отложения, м/с;

t_{max} – температура воздуха при достижении отложением максимального диаметра, °С;

N_{max} – направление ветра при достижении отложением максимального диаметра, град;

v_{max} – скорость ветра при достижении отложением максимального диаметра, м/с;

- D – диаметр отложения, мм;
 L – толщина отложения, мм;
 Day – дата начала случая отложения;
 t_{pp} – температура поверхности почвы, °С;
 t_{tr} – температура точки росы, °С;
 H – относительная влажность воздуха, %;
 D_n – дефицит насыщения, гПа;
 P_s – атмосферное давление на уровне станции, мм рт. ст.;
 $P_{ум}$ – атмосферное давление на уровне моря, мм рт. ст.;
 O_O – облачность (общее количество облаков), в баллах;
 O_N – облачность (количество облаков нижнего яруса), в баллах;
 O_{Cc-Cs} – облачность формы Cc-Cs, в баллах;
 O_{Ac-As} – облачность формы Ac-As, в баллах;
 O_{Cu-Cb} – облачность формы Cu-Cb, в баллах;
 O_{St-Sc} – облачность формы St-Sc, в баллах;
 O_{Fr-nb} – облачность формы Fr-nb, в баллах;
 W – погода в срок наблюдения;
 ww – погода в последний час наблюдения.

Анализ приведённых данных показывает, что в общем виде толщина гололедного образования является функцией как минимум 16 параметров $D=F(T_{nach}, Pr1, t_{nach}, V_{nach}, t_{max}, t_{pp}, t_{tr}, H, P_s, O_O, W, D_n, Pr2, S, P_{ум}, V_{max})$.

Для полноты эксперимента при выявлении влияния того или иного фактора на процесс ледообразования предложено учитывать и геофизические параметры местности расположения измерительного станка.

Для приведённых в таблице данных использовались следующие параметры:

1. Метеостанция расположена между долинами рек Горбыль и Чергали на ровной возвышенности, в восточной части села. Возвышенность имеет превышение над долинами 10...15 м, вытянута с юга на север, заросла густым смешанным лесом, состоящим из берёзы, осины, кустарника.
2. Уровень грунтовых вод не выявлен.
3. Ближайшее окружение метеоплощадки: К С, СВ, ВСВ, В, ВЮВ, Ю, СЗ, на расстоянии 100...120 м, густой смешанный лиственный лес из берёзы, кустарника высотой 8...10 м. К ССВ, ССЗ и З, на расстоянии около 60...70 м, густой смешанный лиственный лес из берёзы, кустарника высотой 8...10 м.
4. Село – к З, ЗС – одноэтажные частные дома на расстоянии 150 м и далее.
5. К ЗЮЗ, на расстоянии 69 м, новое служебное здание высотой 5 м 90 см.
6. К ЗСЗ, на расстоянии около 150 м, группа тополей высотой 15...20 м.
7. На ЮВ, на расстоянии около 400 м, деревья и кустарник высотой 4...5 м.

При оценке толщины отложения использовалась принятая технология определения диаметра отложения на проводах гололедного станка, состоящая в следующем. Вид и продолжительность гололедно-изморозевого отложения определяется визуальным осмотром провода на гололедном станке.

Размеры отложения определяются измерением наибольшей по величине оси поперечного сечения отложения (диаметр D) и расстояния между двумя наиболее удалёнными точками в направлении, перпендикулярном линии диаметра (толщина T).

S	Tnach	Pr1	Pr2	tnach	Nnach	unach	tmax	Nmax	umax	D	L	Day	tpp
13	21	5	8	-27.5	275	1	-28.7	240	1	5	4	04.01.2017	-36
13	22	5	7	-22.8	352	1	-13.8	351	2	5	4	05.02.2017	-33
13	17	7	9	-17.7	273	1	-15.7	327	1	7	6	06.03.2017	-25
13	21	5	7	-22.7	104	2	-22.4	119	2	6	5	22.12.2017	-28
13	16	8	12	-22.0	0	0	-17.5	138	2	6	5	23.12.2017	-21
13	21	5	7	-24.9	307	1	-28.0	269	1	6	5	24.12.2017	-30
13	22	6	8	-27.2	258	2	-22.5	266	2	5	4	02.01.2016	-33
13	19	5	8	-18.2	102	1	-20.0	0	0	6	5	02.03.2016	-22
13	17	6	10	-18.0	0	0	-17.0	98	1	14	13	04.03.2016	-27
13	16	9	11	-13.0	109	1	-14.1	0	0	24	23	17.03.2016	-22
13	18	6	10	-24.7	326	1	-26.2	303	1	5	4	23.12.2016	-33
13	22	3	6	-26.7	107	1	-25.8	116	2	5	4	22.01.2015	-27
13	18	8	10	-28.7	123	2	-24.3	134	2	6	4	23.01.2015	-31
13	15	9	13	-14.8	247	2	-20.5	0	0	8	5	13.02.2015	-21
13	15	9	11	-13.5	271	2	-18.8	317	1	7	4	14.02.2015	-24
13	15	8	12	-17.8	234	1	-20.7	118	1	10	8	26.02.2015	-20
13	16	8	10	-20.9	0	0	-21.7	0	0	9	8	27.02.2015	-30
13	17	3	10	-13.7	262	2	-15.6	253	1	10	7	02.03.2015	-21
13	16	8	10	-16.8	265	1	-16.8	0	0	21	19	03.03.2015	-25
13	16	5	9	-17.8	258	1	-23.6	0	0	6	5	04.03.2015	-26
14	17	5	10	-8.0	286	2	-9.7	255	2	9	8	17.03.2015	-17
13	21	3	6	-19.6	0	0	-15.4	0	0	5	4	12.03.2014	-30
13	22	3	5	-22.0	108	1	-19.2	126	1	5	4	14.03.2014	-28
13	12	14	15	-14.0	0	0	-17.9	113	1	5	3	20.11.2014	-11
13	18	6	11	-30.6	246	1	-31.0	253	1	5	4	11.12.2014	-37
13	18	6	12	-20.3	173	1	-21.6	0	0	8	6	28.12.2014	-27
13	19	6	11	-19.9	0	0	-18.8	291	1	9	7	29.12.2014	-19
13	14	9	12	-14.7	0	0	-14.9	0	0	9	6	01.03.2013	-24
13	18	5	8	-18.2	169	1	-19.2	218	1	5	4	18.03.2013	-24
13	19	5	6	-12.4	322	1	-11.6	288	1	5	3	29.03.2013	-20
13	21	2	3	-12.3	226	2	-12.3	226	2	5	4	31.03.2013	-24
13	15	6	13	-13.5	0	0	-15.0	0	0	23	23	17.11.2013	-5
13	21	6	8	-27.6	298	1	-23.1	320	2	5	3	05.01.2012	-32
13	19	5	8	-19.8	0	0	-22.5	0	0	9	8	05.03.2012	-32
16	9	2	16	0.2	315	6	-0.2	144	1	28	25	13.04.2012	1
13	17	8	11	-15.5	0	0	-16.6	0	0	10	9	10.12.2012	-24
13	17	6	12	-24.4	248	1	-31.1	230	1	10	9	07.01.2011	-35*
13	21	3	8	-24.9	0	0	-25.9	0	0	6	5	25.01.2011	-34*
13	16	8	9	-13.4	99	4	-12.4	126	4	5	4	22.02.2011	-22
13	19	5	6	-12.5	0	0	-12.3	108	2	12	11	26.03.2011	-18
14	19	5	5	-5.0	0	0	1,04	115	1	11	9	22.04.2011	-4
13	21	5	8	-34.4	276	1	-35.0	268	1	5	4	24.12.2011	-36*
13	17	9	11	-22.3	125	2	-18.6	247	1	8	3	08.01.2010	-30
13	22	5	10	-31.8	0	0	-26.4	135	2	6	5	30.01.2010	-42*
13	16	8	14	-22.4	45	2	-24.9	0	0	8	4	09.02.2010	-27
14	21	3	7	-8.8	0	0	-3.8	0	0	6	5	31.03.2010	-16
13	16	5	14	-14.2	0	0	-18.2	357	1	13	11	30.12.2010	-22
13	21	3	7	-28.8	0	0	-29.0	0	0	6	4	06.01.2009	-36*
13	18	6	12	-31.8	0	0	-29.2	0	0	5	3	08.01.2009	-36
13	18	6	13	-23.0	0	0	-20.3	0	0	13	12	14.01.2009	-37*
13	22	3	4	-15.3	0	0	-13.6	67	1	7	6	16.03.2009	-24
13	18	6	8	-21.7	0	0	-23.3	0	0	8	7	21.03.2009	-32
13	17	6	9	-15.2	0	0	-18.5	0	0	13	12	26.03.2009	-27
13	18	5	8	-9.0	0	0	-13.0	0	0	14	14	29.03.2009	-20
13	18	6	10	-20.8	0	0	-21.3	180	1	6	4	21.11.2009	-26
13	22	5	8	-28.0	225	1	-24.9	270	1	5	4	13.12.2009	-38*

Рис. 1. Метеорологические данные



ttt	H	Dn	Ps	Pym	OO	ON	OCc-Cs	OAc-As	OCu-Cb	OST-Sc	OFr-nb	W	ww
-30.9	73	0.18	993.6	1025.9	58	0	0	0	0	0	0	0	10
-25.4	79	0.21	988.4	1019.9	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-19.9	83	0.26	987.3	1018.1	75	0	0	0	0	0	0	1	2
-25.5	78	0.22	985.6	1017.0	58	0	0	0	0	0	0	0	10
-24.7	79	0.22	990.1	1021.6	57	10	0	8	2	0	0	7	71
-27.9	76	0.20	989.2	1021.0	57	4	0	1	0	0	0	1	10
-30.2	75	0.17	989.0	1021.1	78	0	0	0	0	0	0	0	2
-21.1	82	0.25	992.0	1023.1	58	10	0	5	0	0	0	1	10
-20.2	83	0.26	1000.0	1031.2	56	0	0	0	0	0	0	0	10
-14.3	90	0.23	983.5	1013.3	75	0	0	0	0	0	0	0	2
-27.6	77	0.19	999.5	1031.6	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-29.8	75	0.17	995.3	1027.5	56	10	0	5	0	0	0	1	10
-31.9	74	0.15	993.6	1026.0	81	0	0	0	0	0	0	0	2
-16.3	88	0.24	982.8	1013.1	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-15.3	86	0.31	981.3	1011.4	84	0	0	0	0	0	0	1	2
-19.7	85	0.23	991.8	1022.8	81	10	0	3	0	0	0	2	2
-23.0	83	0.20	992.2	1023.6	77	0	0	0	0	0	0	0	2
-15.1	89	0.24	981.0	1011.1	76	10	0	3	0	0	0	7	2
-18.5	87	0.22	986.3	1017.0	62	10	0	3	0	0	0	1	2
-19.6	86	0.21	989.5	1020.4	66	0	0	0	0	0	0	0	2
-8.6	94	0.21	984.3	1013.8	62	0	0	0	0	0	0	0	2
-19.6	99	0.00	993.4	1024.7	50	0	0	0	0	0	0	0	10
-22.6	96	0.05	988.2	1019.6	80	4	0	1	0	0	0	0	2
-13.9	70	0.91	988.6	1018.5	84	10	0	8	4	0	0	2	2
-34.0	72	0.14	992.0	1024.6	59	10	0	3	0	0	0	2	10
-22.3	84	0.20	989.1	1020.3	83	0	0	0	0	0	0	1	2
-22.0	83	0.22	984.3	1015.3	50	10	0	8	2	0	0	7	71
-14.7	100	0.00	988.3	1018.8	56	0	0	0	0	0	0	0	10
-18.8	97	0.07	974.6	1005.1	84	0	0	0	0	0	0	7	2
-13.7	88	0.24	983.4	1013.4	84	10	0	3	0	0	0	2	2
-12.3	98	0.00	986.1	1016.1	99	0	0	0	0	0	0	0	2
-8.4	75	1,13	991.0	1020.3	99	10	0	8	2	0	0	2	2
-29.3	87	0.10	994.4	1026.7	72	0	0	0	0	0	0	0	2
-21.0	92	0.13	994.9	1026.2	84	0	0	0	0	0	0	0	2
0.2	100	0.00	964.3	992.3	6	10	10	8	8	2	0(*600)	8	86
-16.1	96	0.09	994.0	1024.7	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-25.6	88	0.09	987.9	1019.5	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-26.8	86	0.12	1000.8	1032.9	84	1	0	1	0	0	0	0	2
-17.9	95	0.08	992.8	1023.7	68	0	0	0	0	0	0	0	2
-13.1	96	0.12	991.7	1021.9	80	6	0	1	0	0	0	1	2
-5.0	100	0.01	994.9	1024.4	7	0	0	0	0	0	0	4	44
-36.2	83	0.05	991.4	1024.4	81	0	0	0	0	0	0	0	2
-23.4	89	0.10	994.3	1025.8	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-34.1	82	0.09	981.2	1013.7	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-24.2	86	0.15	984.2	1015.5	58	10	0	3	0	0	0	7	70
-8.8	100	0.00	982.7	1012.3	50	6	0	1	0	0	0	1	10
-14.8	95	0.10	989.1	1019.5	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-30.5	87	0.09	998.9	1031.6	70	0	0	0	0	0	0	0	2
-34.1	81	0.09	1002.3	1035.5	84	4	0	1	0	0	0	0	2
-28.8	81	0.14	996.9	1029.1	84	0	0	0	0	0	0	7	2
-15.9	94	0.09	975.8	1005.9	57	10	0	5	0	0	0	1	10
-22.3	94	0.05	989.1	1020.5	57	0	0	0	0	0	0	1	10
-18.2	97	0.08	989.1	1020.0	58	0	0	0	0	0	0	0	10
-10.1	92	0.26	1001.4	1031.6	84	0	0	0	0	0	0	0	2
-22.0	88	0.12	985.9	1017.0	64	0	0	0	0	0	0	7	2
-29.8	84	0.09	990.8	1023.0	57	10	0	3	0	0	0	7	71

Рис. 2. Метеорологические данные (продолжение)

Из результатов измерений диаметр провода d исключается.

Схема измерения диаметра и толщины отложения представлена на рис. 3.

В силу того, что процесс ледообразования (формирование массы отложившегося льда) описывается многопараметрической нелинейной зависимостью и формализовать её в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений очень затруднительно, поэтому для идентификации математического описания процесса целесообразно обратиться к интеллектуальным методам идентификации. Методы идентификации, базирующиеся на нечётком подходе, ориентируются на экспертные знания, которые не всегда имеются.

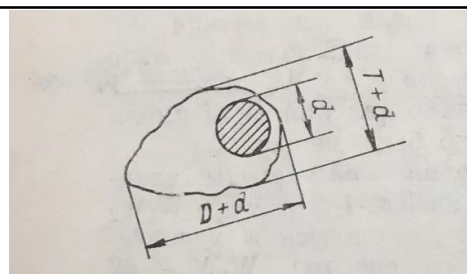


Рис. 3. Схема измерения диаметра и толщины гололедно-изморозевого отложения

Целью обработки полученных статистических данных измерения гололедных отложений является получение экспертной оценки влияния того или иного параметра на процесс гололедообразования, при этом можно оперировать качественными характеристиками.

Обработка результатов базировалась на следующих условиях:

1. За фиксированную величину принимался вид гололедообразования, например, изморозь.
2. Фиксировался диаметр гололедного образования.
3. Для конкретных фиксированных значений строились однопараметрические зависимости базовых параметров для всего имеющегося набора измерений.

Данные зависимости реализовывались на соответствующей плоскости параметров (см. рис. 4–11).

Для определения влияния геофизического месторасположения точки измерения графики зависимостей при одинаковых значениях вида гололедообразования и одинаковых диаметрах приведены на одном рисунке (обозначены литерами а и б).

В рамках данной статьи из-за ограниченности её объёма на рис. 4–11 показаны временные зависимости только ряда основных параметров ледообразования: температуры воздуха в начале нарастания отложения, °С; скорости ветра в начале нарастания отложения, м/с; температуры воздуха при достижении отложением максимального диаметра, °С; скорости ветра при достижении отложением максимального диаметра, м/с; относительной влажности воздуха, %.

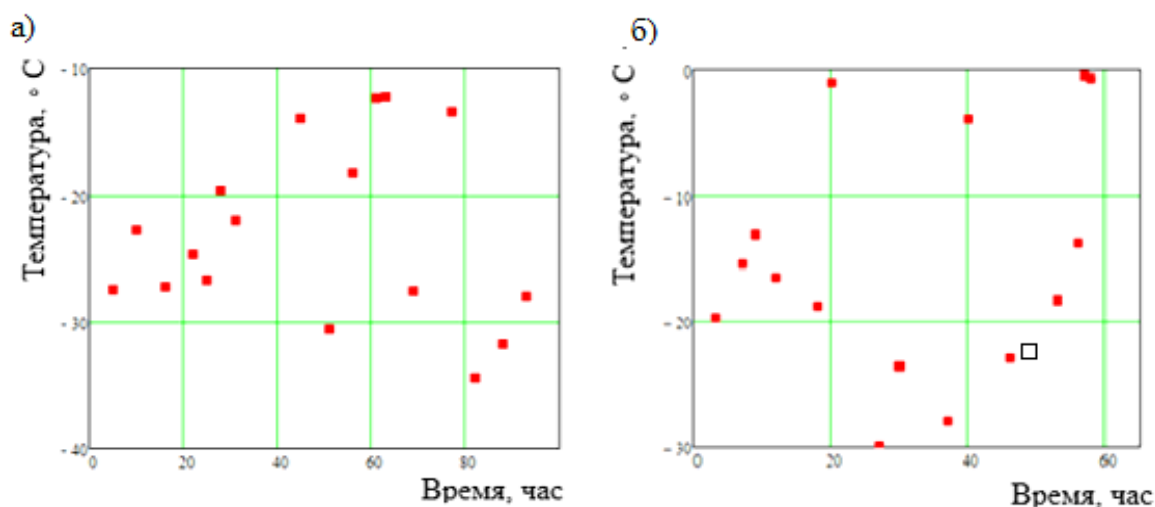


Рис. 4. Зависимость температуры воздуха в начале нарастания отложения от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

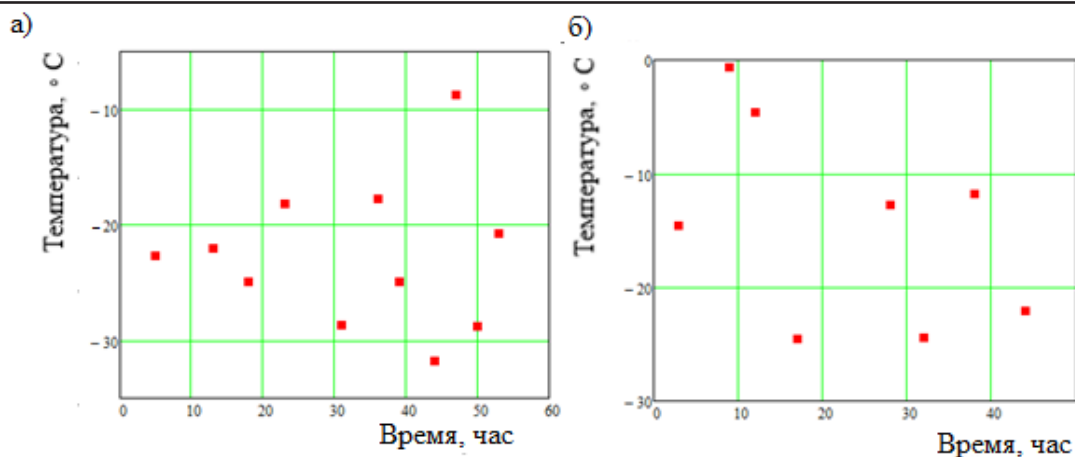


Рис. 5. Зависимость температуры воздуха в начале нарастания отложения от времени при диаметре отложения 6 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

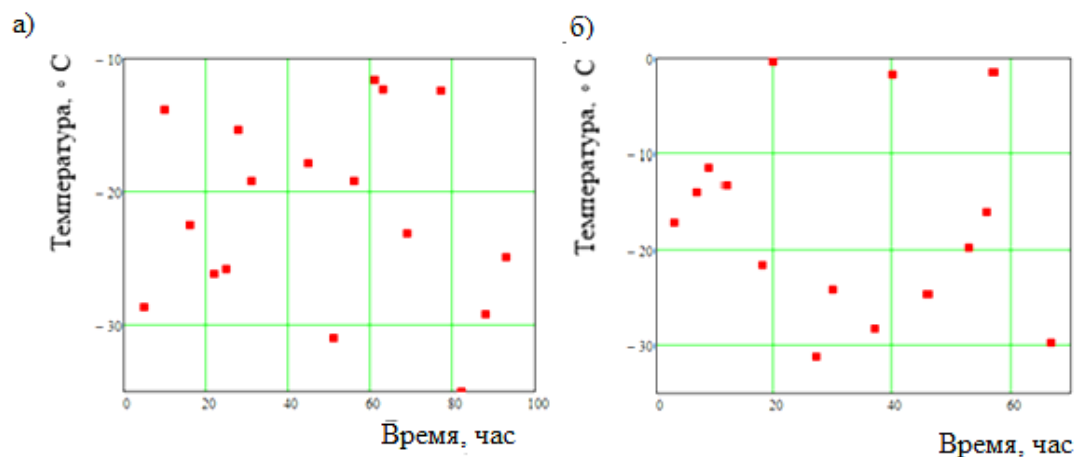


Рис. 6. Зависимость температуры воздуха при достижении отложением максимального диаметра от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

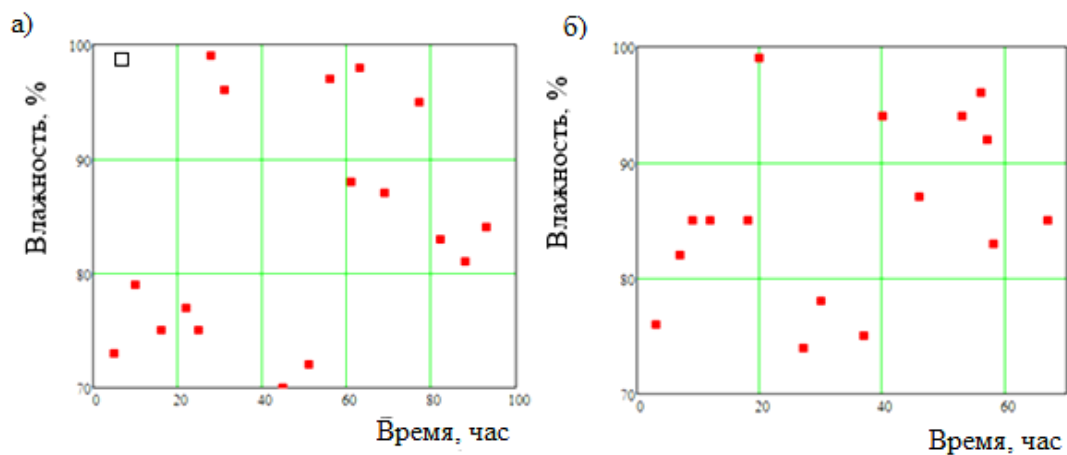


Рис. 7. Зависимость относительной влажности воздуха от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

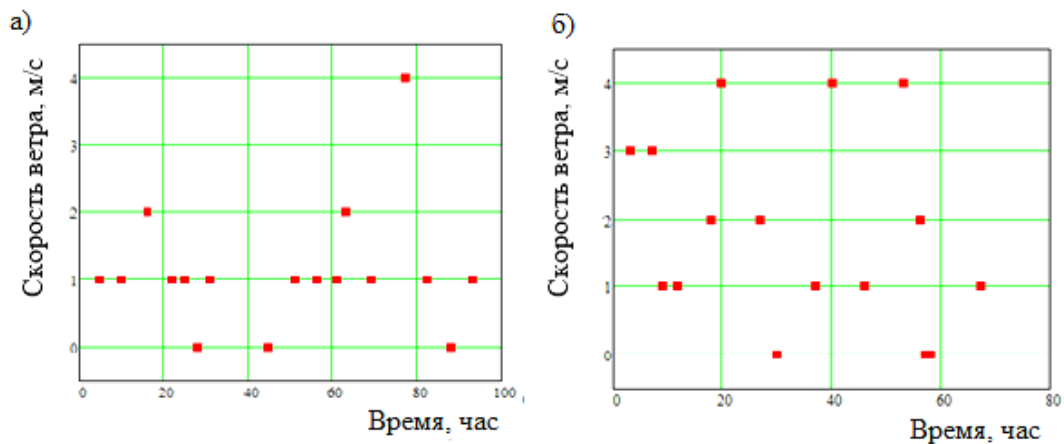


Рис. 8. Зависимость скорости ветра в начале нарастания отложения от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

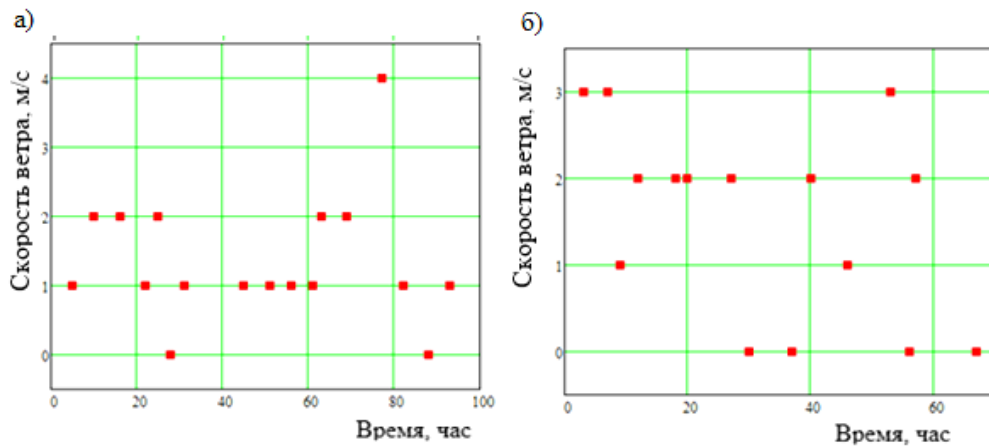


Рис. 9. Зависимость скорости ветра при достижении отложением максимального диаметра от времени при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

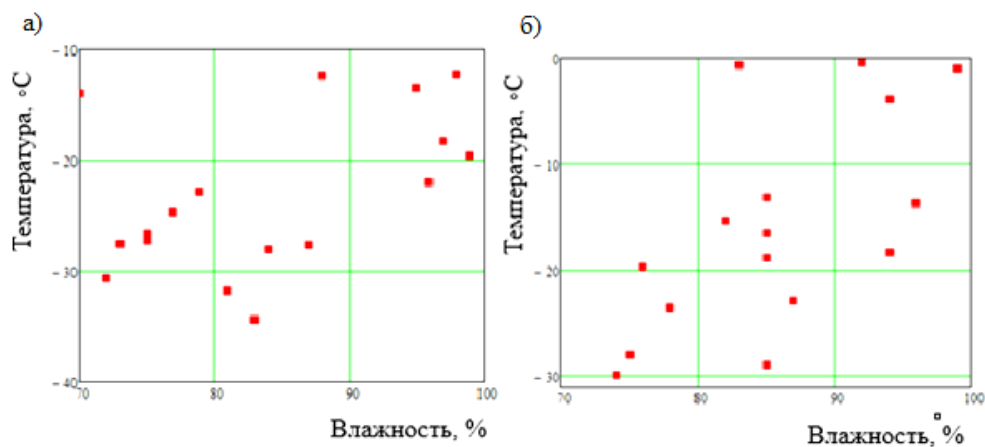


Рис. 10. Зависимость температуры воздуха в начале нарастания отложения от относительной влажности воздуха при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

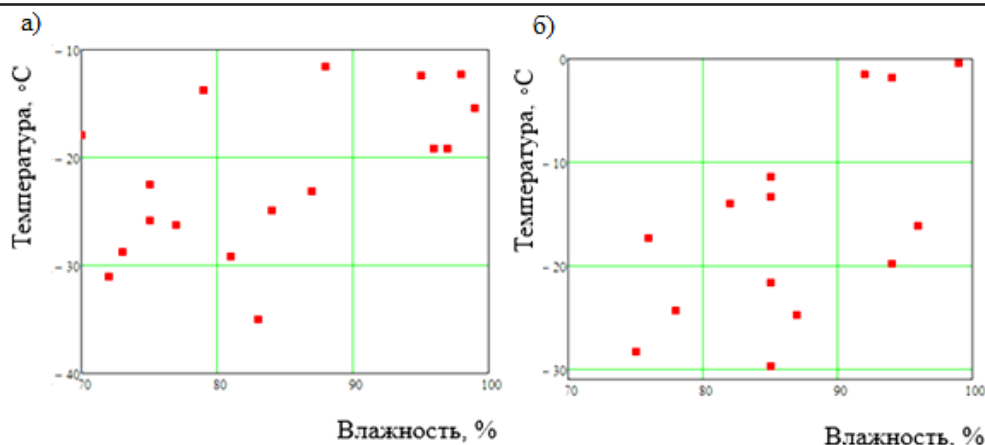


Рис. 11. Зависимость температуры воздуха при достижении отложением максимального диаметра от относительной влажности воздуха при диаметре отложения 5 мм: а – для метеостанции «Братолюбовка»; б – для метеостанции «Николаевск-на-Амуре»

Анализ обработанных результатов измерения, приведённых на рис. 4–11, позволяет утверждать, что описать аналитически временную зависимость ни одного из параметров ледообразования не представляется возможным. Вместе с тем использованный подход посредством попарного сравнения для одной фиксированной точки измерения позволяет выявить, какие из параметров оказывают влияние на процесс ледообразования.

Следует отметить, что оценка влияния может быть описана только качественными характеристиками. Это, в свою очередь, наталкивает на мысль о целесообразности вынесения математического описания процесса ледообразования в область нечётких отношений, то есть поиска адекватного математического описания процесса гололедообразования как некой динамической системы вести на базе принципов нечёткой идентификации. Кроме того, показанные на рис. 4–11 результаты обработки чётко отражают диапазоны изменения каждого параметра в ходе ледообразования, а распределения точек измерения на плоскости в виде некой концентрированной области позволяют использовать её как некий «информационный сгусток» при составлении правил базы знаний.

Таким образом, один из возможных путей создания математического описания процесса ледообразования базируется на принципах нечёткой идентификации. Вышеизложенный подход обработки статистических данных позволяет на качественном уровне оценить влияние того или иного параметра на процесс ледообразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сухоруков, С. И. К оценке возможностей удаления льда с проводов ЛЭП электродинамическим способом / С. И. Сухоруков, В. А. Соловьев, К. Е. Костин // Информатика и системы управления. – 2014. – № 3(41). – С. 148-158.
2. Бучинский, В. Е. Гололед и борьба с ним / В. Е. Бучинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 192 с.
3. Бургсдорф, В. В. О физике гололедно-изморозевых явлений / В. В. Бургсдорф // Труды ГГО. – 1947. – Вып. 3. – С. 3-12.
4. Буков, В. Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полётом / В. Н. Буков. – М.: Наука, 1987. – 232 с.
5. Ноткин, Б. С. Метод синтеза оптимальных нейросетевых регуляторов / Б. С. Ноткин, В. В. Степанюк, К. В. Змеу // Сборник докладов конференции «Молодёжь и научно-технический прогресс». Часть 1. – Владивосток: ДВГТУ, 2004. – С. 232-234.
6. Дьяков, А. Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололедных аварий в энергосистемах / А. Ф. Дьяков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 161 с.
7. Засыпкин, А. С. Интегральная оценка эффективности схем плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи / А. С. Засыпкин, А. Н. Щуров // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 42-45.

8. А. с. 909739 СССР, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления льда с проводов линий электропередачи / И. Р. Пекарь, И. Г. Голикова, В. А. Бочаров (СССР). – № 2961501/24-07; заявл. 15.07.1980; опубл. 28.02.1982. Бюл. № 8. – 3 с.
9. А. с. 936149 СССР, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололедных отложений / Ф. Х. Усманов, В. Ю. Кабашов, Р. З. Шайхитдинов (СССР). – № 2929276/24-07; заявл. 23.05.1980; опубл. 15.06.1982. Бюл. № 22. – 3 с.
10. А. с. 957332 СССР, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололедных отложений / В. Ю. Кабашов (СССР). – № 3215097/24-07; заявл. 04.12.1980; опубл. 07.09.1982. Бюл. № 33. – 4 с.
11. Алмаев, М. А. Электромеханическое вибрационное устройство очистки линий электропередачи от гололедных отложений / М. А. Алмаев, А. В. Трофимов // Сборник научно-исследовательских работ аспирантов – финалистов конкурса аспирантов и молодых учёных в области энергосбережения в промышленности, г. Новочеркасск, октябрь 2010 г. – Новочеркасск: Лик, 2010. – С. 3-5.
12. Титов, Д. Е. Мониторинг интенсивности гололедообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях: дис. ... на соискание учёной степени канд. техн. наук / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.
13. Титов, Д. Е. Физические процессы образования гололедных отложений на проводах воздушных линий электропередачи / Д. Е. Титов // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 1. – С. 31-34.
14. Елизарьев, А. Ю. Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей / А. Ю. Елизарьев, А. Р. Валеев // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 4(70). – С. 59-65.
15. Елизарьев, А. Ю. Вопросы гололедообразования на территории РБ / А. Ю. Елизарьев, А. И. Семендяев // Электротехнические комплексы и системы. – Уфа: УГАТУ, 2014. – С. 7-10.

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА
MATEMATICS AND MECHANICS

Гульков А. Н., Паничев А. М., Савченко В. Н.
A. N. Gulkov, A. M. Panichev, V. N. Savchenko

ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ, ЭФФЕКТ ДЖАНИБЕКОВА И САЛЬТАЦИОННАЯ ГИПОТЕЗА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

ROTATIONAL DYNAMICS OF AXISYMMETRIC BODIES, THE JANIBEKOV EFFECT AND THE SALTATION HYPOTHESIS OF THE ORIGIN AND DEVELOPMENT OF PLANETARY SYSTEMS

Гульков Александр Нефёдович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой нефтегазового дела и нефтехимии Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8. E-mail: alexdvgtu@mail.ru.

Mr. Alexander. N. Gulkov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Oil and Gas and Petrochemistry Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690091, Vladivostok, 8 Sukhanov str. E-mail: alexdvgtu@mail.ru.

Паничев Александр Михайлович – доктор биологических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, старший научный сотрудник Тихоокеанского института географии Дальневосточного отделения Российской академии наук (Россия, Владивосток); 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7. E-mail: sikhote@mail.ru.

Mr. Alexander M. Panichev – doctor of biological sciences, PhD in geological and mathematical sciences, professor, senior researcher Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Vladivostok); 690041, Vladivostok, 7 Radio str. E-mail: sikhote@mail.ru.

Савченко Валерий Нестерович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и экспериментальной физики Дальневосточного федерального университета (Россия, Владивосток); 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8. E-mail: vanes.sav@yandex.ru.

Mr. Valery N. Savchenko – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of the Department of General and Experimental Physics Eastern Federal University (Russia, Vladivostok); 690091, Vladivostok, 8 Sukhanov str. E-mail: vanes.sav@yandex.ru.

Аннотация. В основе современных представлений о происхождении Солнца и планет до сих пор доминирует небулярная (из туманности) гипотеза И. Канта и П. Лапласа, при этом в своей версии гипотезы Кант для объяснения возникновения вихря вводит первым из всех дополнительно к понятию «сила притяжения» понятие «сила отталкивания», которые играют роль тёмной энергии. В первой половине XX века их гипотеза, указывающая на доминирование в процессе образования планет явления упорядоченности, получила развитие в трудах О. Ю. Шмидта, Ф. Хойла и других учёных, тогда как во второй половине XX века в этом процессе стал доминировать хаос. Согласно небулярной гипотезе, все компоненты Солнечной системы возникли практически одновременно из единого газово-пылевого облака. Эволюция облака привела к сосредоточению основной массы всего планетного вещества в немногих крупных телах. Астрофизики полагают, что такая газопылевая туманность образовалась из вращающейся массы межзвёздного газа – прото-солнечной туманности. Возраст Солнца, согласно современным научным данным, насчитывает около 5 млрд лет. Такой возраст основан на данных радиоизотопного анализа древнейших пород Земли, Луны и наиболее древних метеоритов. Оценивая с позиции отрывтого В. А. Джанибековым в космосе феномена инверсии осесимметричного тела, называемого теперь эффектом Джанибекова, наиболее вероятным сценарием формирования Солнечной системы являются периодически совершаемые осевые инверсии. В этом суть предлагаемой авторской сальтационной гипотезы образования нашей планетной системы. С первой и после каждой последующей инверсии от Солнца отрывается часть солнечной материи, которая постепенно преобразуется в очередную планету. Если принять эту гипотезу, то выстраивается стройная система представлений о механизме формирования планет, согласно которой Солнечная система постоянно развивается, растёт количеством входящих в её состав объектов.

Summary. The basis of modern ideas about the origin of the Sun and planets is still dominated by the nebular (out of the nebula) hypothesis of I. Kant and P. Laplace. In his version of the hypothesis, Kant introduces in addition to the forces of attraction the forces of repulsion, which play the role of dark energy. In the 1st half of the XX century

their hypothesis received a certain development in the works of O. Yu. Schmidt, F. Hoyle, and a number of other scientists, pointing to the dominance of orderliness in the formation of planets, whereas in the 2nd half of the century chaos began to dominate this process. According to the nebular hypothesis, all components of the solar system emerged almost simultaneously from a single gas-dust cloud. The evolution of the cloud has led to the fact that the bulk of the entire planetary substance is concentrated in a few large bodies. Astrophysicists believe that such a gas and dust nebula was formed from the rotating mass of interstellar gas - the protosolar nebula. The age of the Sun, according to modern scientific data, is about 5 billion. This age is based on radioisotope analysis of the oldest rocks on Earth and the Moon, as well as the most ancient meteorites. Evaluating from the perspective of the phenomenon of inversion of an axisymmetric body, now called the Janibekov effect, the most likely scenario for the formation of the Solar System are periodically performed axial inversions. This is the essence of the proposed author's salto hypothesis of the formation of our planetary system. Starting from the first and after each subsequent inversion, part of the solar matter comes off the Sun, which is gradually transformed into another planet. If we accept this hypothesis, then a harmonious system of ideas about the mechanism of the formation of planets, according to which the Solar System is constantly evolving, and the number of objects included in it is growing.

Ключевые слова: вращение, инверсия, спин, эффект Джанибекова, планетная система, катастрофы.

Key words: rotation, inversion, spin, Janibekov effect, planetary system, catastrophes.

УДК 550.36, 523.31-35

В данной статье излагается авторская сальтационная гипотеза образования Солнечной планетной системы, в основе которой лежит эффект Джанибекова, ответственный за осевые инверсии нашей звезды, впрочем, как и других звёзд. Этот эффект, на наш взгляд, является основной периодически повторяющейся причиной осевых переворотов Земли, обусловивших множество биосферных катастроф. Мы исходим из разделяемых многими учёными представлений о том, что причины всего произошедшего и происходящего едины во все времена. В связи с этими обстоятельствами стремимся найти эти единые причины, полагая, что наиболее общим природным является *вращение* всех без исключения существующих тел, начиная с мельчайших элементарных частиц, обладающих *спином (вращательным моментом)*, и заканчивая наиболее грандиозными образованиями мироздания – звёздами и галактиками.

25 июня 1985 г. советский космонавт Владимир Джанибеков в орбитальном полёте *открыл феномен*, породивший основания для появления оригинальных гипотез о природе глобальных катастроф, которые могли бы привести как к «великим биосферным кризисам», так и к возможному возникновению и образованию планетных систем типа нашей Солнечной системы. «Эффект Джанибекова» состоял в неожиданном поведении самосвинчивающейся гайки с «ушками» (т. н. «барашка») после её схода с оси болта с резьбой. Возникшее в свободном полёте поступательное движение вращающегося «барашка» сопровождалось *периодическими во времени поперечными переворотами оси вращения на 180°*. Центр массы «барашка» продолжал равномерное и прямолинейное движение. Поразительно, но за более чем 300-летнюю историю существования механики Ньютона (с 1687 года) никто не предсказал такого феномена при орбитальном движении какого-либо осесимметричного тела, каким является механизм такого явления в невесомости – кинематическим (геометрическим) либо динамическим. Этот вопрос остаётся дискуссионным. Однако при движении, каким бы оно ни было экзотическим, сохраняются все динамические характеристики движения: энергия, импульс, момент импульса (вращательный момент). Именно эти три виртуальные характеристики и есть те *три кита*, на которых зиждется мир, и в том числе мир вращений. Поскольку энергия и импульс влиять на перевороты не могут, остаётся сосредоточить внимание на моменте импульса (вращательном моменте).

Прежде чем обратиться к теоретическому объяснению указанного феномена, следует понять, является ли он уникальным, или есть известные примеры кувырков (переворотов) каких-либо естественно существующих в природе тел либо искусственно созданных. Такие естественно существующие тела пока нам неизвестны, но может быть это интересующие нас звёзды и планеты, тогда как к рукотворным, помимо «гайки-барашка» Джанибекова, следует отнести все коробки



по типу спичечного коробка, теннисную ракетку, кельтский камень [2], китайский болванчик или же волчок Томсона (лорда Кельвина), гёмбец [10] и др. Анализ динамики вращения осесимметричных тел позволяет выявить некоторые общие для подобных тел закономерности, если прежде рассмотреть качественно их свободное движение в *ньютонской системе отсчёта* (этот момент использования особой системы отсчёта является для объяснения исследуемого эффекта принципиальным) [5].

Ньютоновские системы отсчёта (в отличие от *инерциальных*) – это идеализированные системы отсчёта, которые могли бы стать реальными системами отсчёта при мысленном удалении всех локальных масс в бесконечность (как в принципе Маха) и двигаться, в силу принятых ограничений, *без ускорения* по отношению к удалённым звёздам, то есть находиться в состоянии невесомости (как в феномене Джанибекова). В этих системах закон сохранения момента импульса означает, что величина и вектор его направления не меняются в течение всего времени, пока на тело не действуют внешние силы (например, в случае свободно падающего тела в пренебрежении приливными силами, как это имеет место на космических орбитальных станциях). Вектор угловой скорости тела (его направление движения в пространстве) – мгновенная ось вращения, при этом может изменяться – возникает прецессия вокруг направления момента импульса, увеличивая во времени амплитуду отклонений, что в итоге приводит к инверсиям (кувыркам) тела в полёте. Причина инверсий указанных тел одна: каждое интересующее нас осесимметричное тело обладает тремя осями симметрии и, соответственно, тремя осями инерции, которые в нашем случае играют роль осей вращения. Среди этих осей выделяют так называемые *главные оси инерции, совпадающие с осями симметрии*, которые обладают тем свойством, что *вращение вокруг них устойчиво*, то есть векторы момента импульса и угловой скорости совпадают по направлению вдоль этих осей в течение всего движения и никакого кувыркания не происходит. Вращение вокруг некоторой третьей оси симметрии *неустойчиво*, вызывает *прецессию* вектора угловой скорости вокруг вектора момента импульса, и в результате возникают кувырки тела в полёте. Так, у спичечного коробка две устойчивые оси вертикального свободного вращения (главные оси инерции) имеют место, когда оси вращения пронизывают наименьшие и наибольшие по площади его противоположные грани, а неустойчивая ось – в случае вращения через оставшиеся две. Тогда щелчком подброшенный вверх и закрученный вокруг главной диагонали спичечный коробок при свободном падении совершает кувырки. У свободно падающей теннисной ракетки две устойчивые оси вращения возникают, во-первых, при вращениях её вокруг оси вертикально расположенной рукоятки и, во-вторых, при расположении ракетки плашмя в горизонтальной плоскости. Кувырки при свободном падении происходят и с теннисной ракеткой, если её, расположенную ребром в вертикальной плоскости (сетка в овале смотрит на нас) с горизонтально расположенной рукояткой, раскрутить, как и в предыдущих случаях, вокруг вертикальной оси. Этот же эффект кувыркания наблюдается и с «барашком» Джанибекова. Во всех случаях направление осей вращения совпадает с направлением свободного движения тел.

Рассмотрим данные явления, теоретически анализируя их в рамках так называемой *теоремы теннисной ракетки*. Система уравнений Эйлера для свободных вращений осесимметричного тела с тремя различающимися главными моментами инерции $I_1 > I_2 > I_3$ и угловыми скоростями $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ вокруг главных осей инерции 1, 2 и 3 [6] имеет вид

$$I_1 \dot{\omega}_1 = (I_2 - I_3) \omega_2 \omega_3, \quad (1)$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 = (I_3 - I_1) \omega_3 \omega_1, \quad (2)$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 = (I_1 - I_2) \omega_1 \omega_2, \quad (3)$$

где $\dot{\omega}_k$ – угловые ускорения (надстрочный штрих указывает на временную производную).

Покажем, что вращение вокруг осей с минимальным I_3 и максимальным I_1 моментами инерции устойчиво. Пусть вращение вокруг оси 1 сопровождается малыми начальными угловыми скоростями вдоль осей 2 и 3. Тогда $\dot{\omega}_1$, согласно (1), также мала, что позволяет ограничиться уравнениями (2) и (3). Дифференцируя по времени (2) и подставляя $\dot{\omega}_3$ из (3), получим

$$I_2 I_3 (\dot{\omega}_2)' = (I_3 - I_1) (I_1 - I_2) (\omega_1)^2 \omega_2 < 0 \quad (4)$$

и заключаем, что ω_2 изменила знак и поэтому, согласно второму достаточному условию об экстремумах, она имеет максимум, и вращение вокруг оси 1 устойчиво. Аналогичный результат можно получить для вращения вокруг оси 3, которое тоже устойчиво. Вращение вокруг оси 2 рассмотрим в предположении малых величин ω_3 и ω_1 , в силу чего $\dot{\omega}_2$ также мала и её зависимость от времени пренебрежимо мала. Продифференцируем по времени (1), подставим в него $\dot{\omega}_3$ из (3), в результате будем иметь

$$I_1 I_3 (\dot{\omega}_1)' = (I_2 - I_3) (I_1 - I_2) (\omega_2)^2 \omega_1 > 0. \quad (5)$$

Поскольку ω_1 не изменила знак и, следовательно, будет возрастать, вращение вокруг оси 2 будет *неустойчивым*. Главный вывод из проведённого анализа: даже небольшие возмущения вдоль других осей заставляют осесимметричное тело совершать кувырки. Не вдаваясь в сложные точные решения указанной системы эйлеровых уравнений вращательного движения (имеющиеся, например, в [6]), можно констатировать, что приведённое качественное объяснение возможности существования эффекта Джанибекова вполне установлено и обосновано.

Однако есть ещё объекты и феномены, на которые следует обратить внимание. Русская неваляшка, не являющаяся в строгом смысле целым геометрическим телом по причине присутствия в ней свободного груза, вызвала интерес математиков к поиску существования выпуклого однородного геометрического тела, по крайней мере, с одним устойчивым положением равновесия на «основании» и одним положением неустойчивого равновесия на «голове». Существование таких тел, получивших название «моно-моностатические», предположил великий российский математик Владимир Арнольд, а доказательство их существования в трёхмерном случае нашли венгерские математики Габор Домокош и Петер Варконьи [11], давшие открытым ими телам название «гёмбёц» (от венгерского *gömböcs* – круглый мясной пирожок). Форма гёмбёца оказалась совершенно непохожей на формы известных типичных представителей других классов равновесия. Они единственные невырожденные объекты в своём классе, *имеющие одновременно минимальную сплюснутость и суженность (вспомним форму небесных тел)*. Приближением к этой форме, по мысли В. Арнольда, обладают некоторые береговые камни, приобретающие её в ходе длительной естественной абразии (постепенного истирания волнами прибоя камня о песок), и самое минимальное – двух устойчивых и двух неустойчивых положений равновесия (Г. Домокош это проверил на нескольких тысячах камней). На этом естественный процесс «огранки» камней завершается, гёмбёцей в природе скорее нет, чем они есть. Домокош отметил: «...Складывается впечатление, что моно-моностатические тела «прячутся» – их трудно представить, трудно описать и трудно опознать». На наш взгляд, такую форму могут приобретать и приобретают, а также и теряют (всё как всегда и везде неожиданно и стохастически) звёзды и планеты, непрерывно эволюционирующие под действием экзо- и эндогенных процессов и причин в непрерывно эволюционирующей Вселенной. По этой общей причине они оказываются способными к спонтанным инверсиям, кувыркам, переходам из равновесных состояний в состояния неравновесные и наоборот.

О безусловной физической причине этого можно узнать, если хотя бы в краткой форме рассмотреть динамику вращательного движения, например, кельтского камня, обладающего в ходе разнообразных раскруток *реверсом*, то есть сменой направления вращательного движения. Кельтский камень – это некий эллипсоид, верхняя часть которого срезана под углом так, что в результате такой операции проявляются эмерджентные (не предугадываемые заранее, неожиданные) формы его движения: устойчивые вращения в одну сторону (без реверса), при раскрутке в другую сторону сопровождаются большими прецессионными амплитудными качаниями, остановкой и последующим реверсом во вращении. Причиной реверса кельтского камня является его *динамическая асимметрия* [2], существующая благодаря тому, что уравнения, описывающие его движение, остаются ковариантными (неизменными, сохраняющимися по форме в случае их аналитической записи), если обратить время и скорости в прошлое, сохранив ориентации. Оказывается тогда, что если в системе есть устойчивое движение, то обязательно найдётся симметричное ему неустойчи-

вое движение (как и в гёмбёцах). Математически было установлено [2], что в движении кельтского камня как диссипативной системы (теряющей, рассеивающей энергию) возникают *хаотические режимы*, ведущие к странным аттракторам лоренцевского типа [8]. Последнее для диссипативных систем означает, что у кельтского камня в движении есть не только притягивающие к себе (к аттрактору) неподвижная равновесная точка (фокус) и периодическая траектория (предельный цикл), но и квазипериодические траектории со сложной геометрической структурой, которые имеют *дробную* (уже принято говорить – *фрактальную*) размерность, которые и называются в этих случаях *странными аттракторами*. Движение на странных аттракторах является хаотическим, а фазовый «портрет» странного движения очень напоминает маскарадную маску, надеваемую на глаза. Все вышеизложенные явления содержатся в неголономной модели (когда учитываются геометрические и кинематические связи, накладываемые на скорости) движения кельтского камня, что бумерангом выводит проблему устойчивости вращающихся тел, в том числе небесных тел на новый теоретический уровень, в центре которого базируется *нелинейная стохастическая динамика* [2; 8] и *динамика неголономных систем*. При этом не исключена вероятность существования вовсе неизвестного пока закона движения вращающихся тел в космосе.

Как ни странно, не меньший интерес в исследуемой проблеме инверсий тел вызывают объекты микромира: фермионы – электроны и барионы, обладающие *природным моментом импульса – спином s* . Так, спин электрона, выраженный в единицах постоянной Планка \hbar , равен $\hbar/2$, что создаёт два его устойчивых состояния (имеет две устойчивые проекции спина s) $\pm \hbar/2$ в атоме. Элементарный акт излучения атома, сопровождаемый изменением знака проекции спина электрона на \hbar (обусловленной инверсией спина), состоит в появлении нового объекта – фотона с энергией $\varepsilon = \hbar\omega$, где ω – круговая частота (частота в радианах), а \hbar – спин фотона. Фотон в каждом акте излучения уносит из системы вдвое больший спин (момент импульса), чем имеется у электрона. Приведённый факт излучения не исключает, а скорее указывает на то, что за миллиарды лет излучение фотонов (света) Солнцем привело его собственный вращательный момент к практическому исчезновению, поскольку его доля в полном моменте Солнечной системы сейчас близка к 2 %, тогда как доля массы Солнца составляет около 99,7 %. Последними замечаниями о спинах частиц нашего мира мы хотим обратить внимание на то, что инверсии на уровне микромира вполне могут определять инверсии на макроуровне и уровнях планетном и звёздном. А ещё одной и, возможно, главной причиной потери вращательного момента звёздами (и нашим Солнцем) могут быть их осевые инверсии, порождающие в их окрестностях планетные системы. К краткому обоснованию этой сальтационной гипотезы мы теперь и переходим.

Теоретические прогнозы прошлого и настоящего поведения Солнца принято рассчитывать в соответствии с пятью предположениями А. Эддингтона, бывшими идеальными для развития теорий с 1926 года, но спорными для настоящего времени по ряду признаков. Эддингтон полагал, что Солнце как звезда: 1) сферически-симметричное гидростатическое равновесное тело; 2) находится в состоянии теплового равновесия с незначительно возрастающей энтропией, связанной с эволюцией; 3) изменение его химического состава обусловлено ядерными реакциями *pp*- и *CNO*-циклов; 4) вещество перемешивается только в конвективной зоне (над *ядром* Солнца толщиной около 0,25 радиуса Солнца R_{\odot} расположена *зона излучения* толщиной около 0,45 R_{\odot} , а ещё выше расположена *конвективная зона* толщиной около 0,3 R_{\odot}); 5) первоначально было однородным по химическому составу и эволюционировало практически без изменения массы в течение 4,7 млрд лет к современным значениям радиуса и светимости. Всё ли так бесспорно среди указанных предположений? Отнюдь нет. Во-первых, форма Солнца не *сферически-симметричная*, поскольку сейчас достоверно установлена *яйцевидная форма* звёзд и большинства планет, то есть форма слегка *сплюснутых* и *суженных* геометрических тел, сходных с формой *гёмбёца* [10]. Во-вторых, согласно современным представлениям [7], предшественником Солнца был голубой сверхгигант, древнейший химический состав которого унаследован от сверхмассивных (от 100 до 1000 M_{\odot}), мало просуществовавших (не более 3 млн лет) первых звёзд Вселенной, обогащённых тяжёлыми химическими элементами и взрывавшихся, как сверхновые *SN II*. В-третьих, вероятнее всего

в окрестностях Солнца *никогда не было первородного газовой-пылевого облака*, из которого формировались планеты согласно самым современным небулярным гипотезам.

Солнечная система состоит из центральной звезды – Солнца – и из окружающего его множества небольших тел – планет, их спутников, астероидов, комет и бесчисленных мелких метеорных частиц и пылинок. Восемь планет являются главными спутниками Солнца, но их суммарная масса в 743 раза меньше массы Солнца. Суммарная же масса всех остальных малых тел Солнечной системы, включая облако комет, составляет $\sim 10^{-5} M_{\odot}$ [3]. Предшественник Солнца, голубой сверхгигант, образовавшийся не менее 10...15 млрд лет назад в одном из четырёх рукавов нашей спиральной Галактики типа *SB*, неоднократно взрывавшийся затем как сверхновые типа *SN II*, впоследствии выброшенный в коротационную зону Галактики и начавший новое существование в образе Солнца не менее 5 млрд лет назад, не образовался вместе с другими звёздами Галактики. Подтверждением этому может служить факт нахождения Солнца в настоящее время на расстоянии около 10 килопарсек от центра Галактики на внутреннем краю рукава Ориона, в одном из 40 *звёздных комплексов* Галактики, расположенных вдоль спиральных рукавов. Хотя Солнце и находится в одном из звёздных комплексов (местная система звёзд), *оно не является его членом*, поскольку возраст Солнца значительно больше возраста остальных звёзд комплекса, кроме того, Солнце имеет другую кинематику (орбитальная скорость 220 км/с, галактический год – период обращения – длится 240...250 млн лет). Указанное выше соотношение между массами Солнца и планет объясняется отсутствием изначального собственного газовой-пылевого облака у Солнца, что может подтвердить наблюдение (в апреле 2013 г.) астрономами гамма-вспышки GRB 130427A, *когда массы звезды разлетались со скоростью света, нарушая каноны специальной теории относительности* (публикация в *Science*, информация на сайте nicola.omedei@stanford.edu). Если бы подобное когда-то произошло с Протосолнцем, то уже через несколько суток (даже не лет!) возле него образовалась бы «пустыня» на многие тысячи астрономических единиц (астрономическая единица – наше удаление от Солнца – 150 млн км), так что *планетный ресурс пришлось извергать из собственных недр*. В марте 2017 г. НАСА сообщило, что телескоп «Хаббл» зарегистрировал самую большую звезду – Westerlund 1-26 – в нашей Галактике, она в 1500 раз больше нашего Солнца и ярче в 330 тыс. раз; выбрасывает в космическую среду огромное количество материи, и *выбросы эти сформировали около неё туманность*. Перечисленных фактов достаточно для того, чтобы нашу сальтационную гипотезу рассмотреть как заслуживающую внимания уже по этим нескольким фактам. Если допустить, что Солнце неоднократно взрывалось и даже перемещалось в пределах Галактики, то возникает закономерный вопрос о справедливости замены небулярных гипотез сальтационной гипотезой. При этом вполне обоснованной становится идея о том, что планеты Солнечной системы порождены из недр самого Светила в результате его инверсий (кувырков).

Подобные инверсии могут быть объяснены особенностью вращений тел типа «китайского волчка-болванчика» [2]. При раскручивании у него возникает *прецессия*, его тело наклоняется к горизонтальной плоскости и его *центр массы поднимается*. В результате действия двух этих результирующих факторов он теряет равновесие, опрокидывается, продолжая вращение вниз «головой». Здесь важен факт поднятия центра масс, нарушающий равновесие. В связи с этим рассмотрим модельный эксперимент, весьма важный для нашей гипотезы [5]. Пусть через вертикально расположенную трубочку продета нить, на концах которой закреплены две массы *m* и *M*. Массу *m* будем раскручивать по окружности радиуса *r* с некоторой угловой частотой ω , в результате чего она приобретает скорость $v = \omega r$, в момент импульса – величину $mr^2\omega$. Масса *M* своим весом *Mg* будет противовесом силе, точнее, моменту силы, направленному точно вверх, возникающему у массы *m* при вращении. Если теперь по каким-либо причинам вращение ускоряется, растут моменты орбитальной и силы, вес *Mg* уже не компенсирует возросшую силу, поэтому центр масс системы поднимается (как и в случае с китайским болванчиком). В природе всегда действуют причины, стремящиеся сохранить прежнее состояние системы (это закон инерции, 3-й закон динамики Ньютона о силах действия и противодействия, явление образования ячеек Бенара, принцип Ле-Шателье – Брауна, реакция Белоусова – Жаботинского, негэнтропийный процесс в живых



организмах по Вернадскому и т. д.). В нашем случае при условии необходимости сохранения формы тела (величины r) сохранение величины $mr^2\omega$ при возрастающей частоте ω может произойти только при избавлении от части массы Δm (отрыве части массы), когда оторвавшаяся масса Δm отправится в свободный полёт по направлению касательной к кругу в точке отрыва. Мы предполагаем, что подобные явления могут происходить и со звёздами, когда они теряют часть своей массы, а в некоторых случаях, в силу меняющихся условий равновесия и симметрии формы, из-за множества спонтанно возникающих причин ещё и опрокидываются. Уверенность в этом даёт эффект Джанибекова. Почему? Во-первых, потому, что сразу же «встали на место» многие ранее казавшиеся необъяснимыми загадочные геологические и палеонтологические факты из истории Земли. И, во-вторых, стало понятно, почему все вращающиеся тела в условиях Земли в случае свободного выбега после раскрутки при достижении определённых скоростей иногда демонстрируют яркие признаки неустойчивости вращения. Нам стало понятно также, почему планеты Солнечной системы имеют разнонаправленное осевое вращение. На основе представлений о переворотах Солнца у нас начали складываться внятные представления о механизме формирования самих планет Солнечной системы и всех их естественных планет-спутников.

Для более полного обоснования гипотезы рассудим, как может происходить инверсия на нашей планете и есть ли этому геологические подтверждения? Конечно есть. По мере развития процесса осевой инверсии все объекты на поверхности планеты будут испытывать резко нарастающее воздействие меняющихся направления сил инерции. Это означает, что по всей Земле придут в движение воздушные и водные массы. В итоге гигантская волна морской воды несколько раз прокатится по земному шару. В результате большая часть не только растительности, но и почв, рыхлых отложений будет перенесена на значительные расстояния и беспорядочно свалена в ближайшие «овраги» (сопоставимые по масштабам таких куч). Позднее эти гигантские «овраги», заполненные бесчисленными вырванными, переломанными и спрессованными весом залегающих на них горных пород деревьями, превратятся в месторождения каменного угля. Разумеется, большая часть вырванных деревьев более или менее равномерно распределится по акватории океанов и осядет на дно лишь тонким углистым прослоем. Этим мы хотим сказать, что часть существующих угольных месторождений (какая именно часть – нужно разбираться) сформировалась в результате осевых инверсий. Именно таким механизмом образования угольных месторождений можно объяснить происхождение невероятно сложной структуры ряда угленосных отложений вплоть до появления пока не объяснённых геологами-угольщиками таких аномальных структур, как Z-образные межпластовые переходы, полистратное залегание обугленных стволов древесины, массовые захоронения в углях динозавровой фауны. Подобные факты, к примеру, известны среди угольных месторождений на территории Европы.

Главное, мы считаем, что Солнце, движущееся в космосе по галактической орбите вдоль оси вращения, периодически совершает кувырки. После каждого такого кувырка от Солнца отрывается часть солнечной материи, которая постепенно преобразуется в очередную планету. Если принять это допущение, то выстраивается вполне понятная, можно даже сказать, стройная система представлений о механизме формирования планет, согласно которой Солнечная система постоянно развивается, растёт количеством входящих в неё объектов. После первого переворота часть отделившейся от Солнца солнечной плазмы обособляется в плотный вращающийся сгусток, который занимает первую «энергетически разрешённую» орбиту – орбиту Меркурия. Так начинается формирование планетной системы.

Советский астрофизик К. П. Бутусов показал, что правило планетных орбит Тициуса – Боде есть следствие «резонанса волн биений», в результате чего периоды обращений планет образуют числовые ряды Фибоначчи и Люка [4]. О том, что орбиты планет в звёздных системах занимают всегда закономерное положение, свидетельствуют и космологические данные. Так, Д. Уилкок в книге «Божественный космос» сообщает об открытии британскими астрономами трёх экзопланет, вращающихся вокруг пульсара B1257+12, близкого по размерам к размерам Солнца, отношение расстояний между которыми (1:0,77:0,4) оказалось сопоставимым расстояниям между Землёй, Венерой и Меркурием (1:0,72:0,39).

Вторая планета на орбите условного Меркурия появилась после второго переворота Солнца, и этим актом первая планета была отброшена на вторую разрешённую орбиту. И так далее до тех пор, пока Солнечная система не обрела современный облик. Следует указать, что первыми должны были появиться тяжёлые планеты, когда у Солнца ещё был велик вращательный момент и оно исторгало из себя большие массы. Постепенно вращательный момент ослабевал, в том числе по причине излучения фотонов, уносящих каждый, согласно нашей версии, момент импульса, равный постоянной Планка \hbar . Последними, согласно нашей гипотезе, Солнце образовало планеты земной группы – Марс, Землю, Венеру, Меркурий.

Как известно, в пространстве между Марсом и Юпитером, согласно правилу Тициуса – Боде, должна была находиться некая планета, но оно заполнено множеством астероидов различной массы, а по поводу планеты в XIX веке Генрих Ольберс предположил, что она рассыпалась от удара извне или от внутреннего взрыва. Эту гипотетическую планету впоследствии назвали Фаэтон и оценили её размер как сопоставимый с размерами Земли. Вместе с тем, согласно развиваемой в данной статье идее, следует отметить и вероятность того, что планета могла и вовсе не сформироваться. Отделившееся при очередном перевороте Солнца вещество могло попросту не объединиться в единый сгусток-планету, по какой-то причине оно распалось на множество осколков. Аналогично ранее могли образоваться и тела-пояса Койпера, и даже кольца Сатурна (при первых самостоятельных переворотах этой планеты оторвавшееся от неё вещество по какой-то причине просто не объединилось в массивные спутники).

Далее попытаемся охарактеризовать последовательность событий в Солнечной системе в период после рождения планеты Земля, весьма отличающуюся от всех уже известных в планетологии схем. Если исходить из логики развиваемой нами гипотезы, вслед за Землёй образовалась Венера. При этом Венера заняла орбиту Меркурия, отбросив Землю на современную орбиту Венеры и отодвинув Марс и остальные планеты к периферии Солнечной системы. При следующем перевороте Солнца образовалась планета Меркурий. Итого за период существования Земли возникло две планеты, что должно было отразиться в геологической летописи как две вселенские катастрофы. Реальные же геологические данные указывают на то, что с начала архея было как минимум четыре глобальных суперкатастрофических события: 3,6; 2,6; 1,65 и 1,05 млрд лет назад, которые сейчас трактуются болидными бомбардировками при «пролётах Солнца сквозь массивные звёздные облака» [1].

У нас на этот счёт трактовка другая. Два из четырёх событий могли быть связаны с рождением Венеры и Меркурия, а два другие – с событием на Фаэтоне и с появлением Луны. При этом Луна могла образоваться не только при первом перевороте Земли в результате отрыва части земного вещества (как известно, идею появления Луны в результате отрыва части вещества от Земли на рубеже архея – протерозоя поддерживал В. И. Вернадский). Вполне допустима версия о том, что Луна могла возникнуть и в результате соударения крупного болида с Землёй, выбившего часть земного вещества и оставшегося спутником нашей планеты. Поскольку событие на Фаэтоне не факт, а лишь предположение, заменить его может ещё одна супербомбардировка Земли крупным болидом или несколькими болидами, прилетевшими с периферии Солнечной системы.

Если предположить, что периоды между переворотами Солнца имеют более или менее равную длительность, то при периодичности этих событий в 0,6 млрд лет (1,65 минус 1,05) возраст Солнечной системы будет оцениваться около 10 млрд лет (период времени, необходимый для формирования восьми планет, а также поясов Фаэтона и Койпера). При удлинении периодичности между переворотами Солнца до 1 млрд (3,6 минус 2,6) возраст Солнечной системы соответственно ещё более увеличивается.

И в заключение отметим, что пока никто не доказал, что за орбитой Койпера нет других планет Солнечной системы, в том числе ещё одного пояса, подобного поясу Койпера. Здесь стоит напомнить: астрономы предполагают о существовании некоторого множества планетоидов на периферии Солнечной системы, называя его «облаком Оорта». Если предположить, что наблюдаемая дважды в Солнечной системе последовательность из четырёх планет и пояса астероидов характеризует закономерный ритм, то логично допустить, что за орбитой Койпера имеются, как ми-

нимум, ещё четыре планеты, и только на следующей, пятой, орбите – ещё один пояс астероидов. Вышеизложенные мысли, разумеется, лишь эскизные наброски, требующие серьёзной детализации и приведения в строгую систему, а проверить справедливость высказанных идей можно скрупулезным анализом геологических фактов, чего мы себе и всем заинтересованным желаем.

Выводы

Итак, все планеты и астероидно-метеоритные пояса Солнечной системы порождены Солнцем по причине его осевых инверсий. В результате очередной инверсии Солнца не только рождается очередная новая планета, но и происходит перескок уже существующих планет на более удалённые от Солнца орбиты. В процессе перескоков планет в интервале орбит от Меркурия до Юпитера эволюция планетного вещества идёт с уменьшением его плотности и ростом объёма, за счёт чего увеличиваются размеры планет. Максимум «раздува» планет за счёт газовой составляющей происходит на орбите Юпитера. За орбитой Юпитера эволюция планет идёт с уменьшением объёма преимущественно по причине преобразования газов в льды.

Наиболее яркие реперные рубежи вселенских катастроф, замеченные исследователями геологической истории Земли более 200 лет назад и позиционируемые многими современными исследователями как рубежи событий, запускавшие биосферные кризисы, с нашей точки зрения, указывают на происходившие в прошлом осевые перевороты планеты. Всего подобных реперных рубежей за последние 700...900 млн лет геологическими методами зарегистрировано около 30. Если предположить, что подобные катастрофы имеют более или менее строгую периодичность, то период «спокойной жизни» планеты должен составлять около 23...30 млн лет. Последняя такая катастрофа, вероятнее всего, была на границе палеогена и неогена. Как показывают специальные исследования, на которые ссылается К. В. Симаков (1999) [9], периодичность массовых вымираний с интервалом, близким к 25...30 млн лет, существует, но не всегда выдерживается. Например, в течение фанерозоя отмечаются периоды некоторого сгущения массовых вымираний, например, во второй половине девонского периода, в конце перми и в конце триаса. Цепь событий, которая запускается осевыми переворотами планеты, выстраивается таким образом:

1. В результате переворота происходит резкая активизация тектоно-магматических процессов и проявлений вулканизма с выбросом огромного количества пепла и вулканических газов (прежде всего оксида углерода), что приводит к резкому похолоданию климата и наступлению длительного ледникового периода (иногда с глобальным охватом). Большая часть живых организмов погибает.

2. По мере затухания вулканической деятельности и осветления атмосферы в условиях избытка углекислого газа начинается разогрев атмосферы (парниковый эффект). Одновременно начинается резкая активизация жизни в океанах, в том числе с накоплением органогенных карбонатов, а также бурный рост растительности на континентах. Периодически вспыхивающие пароксизмы вулканической деятельности могут возвращать биосферу в состояние оледенений. В этих ситуациях всё повторяется.

3. Наконец, когда вулканы окончательно стихают, в биосфере начинается очередной устойчивый «взрыв биоразнообразия».

Что касается биосферных катастроф более низкого порядка, то механизм их запуска другой. Причинно они связаны со вспышками в ближнем космосе сверхновых звёзд. Здесь вполне можно допустить, что вероятность таких событий усиливается в периоды пересечения Солнечной системой «галактических рукавов», где плотность звёздного окружения наиболее высока. Катастрофической кульминацией становится бомбардировка Земли кометами и болидами, что продолжается обычно на протяжении нескольких лет. Кометные и астероидные бомбардировки являются результатом резкого изменения орбит (по направлению к орбите Земли) объектов поясов Оорта, Койпера и Фэтона под воздействием ударных волн от сверхновых звёзд. После соударения космических тел с Землёй активизируется тектоническая и вулканическая деятельность. Дальше всё тот же сценарий, только трагедийная часть «природной пьесы» существенно короче и поменьше охват действующих субъектов и объектов. Количество «малых катастроф» в геологической истории планеты, как и наличие соответствующих достоверных реперных горизонтов, точно отследить

весьма трудно. Вероятнее всего, именно с такими катастрофическими событиями связано появление многих геохимических аномалий, типичных для импактитов, прежде всего иридиевых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баренбаум, А. А. Галактическая парадигма и её следствия [Электронный ресурс] / А. А. Баренбаум. – Режим доступа: http://www.abitura.com/modern_physics/barenbaum_1.htm.
2. Борисов, А. В. Странные аттракторы в динамике кельтских камней / А. В. Борисов, И. С. Борисов // Успехи физических наук. – 2003. – Т. 173. – № 4. – С. 407-416.
3. Бурундуков, А. С. Фундаментальные структуры: эмпирические системы / А. С. Бурундуков. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 304 с.
4. Бутусов, К. П. «Золотое сечение» в Солнечной системе / К. П. Бутусов // Некоторые проблемы исследования Вселенной. – 1978. – Вып. 1. – С. 475.
5. Кемпфер, Ф. Путь в современную физику / Ф. Кемпфер. – М.: Мир, 1972. – 376 с.
6. Ландау, Л. Д. Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 206 с.
7. Ларсен, Р. Первые звёзды Вселенной / Р. Ларсен, В. Бромм // В мире науки. – 2002. – № 10. – С. 36-44.
8. Лихтенберг, А. Регулярная и стохастическая динамика / А. Лихтенберг, М. М. Либерман. – М.: Мир, 1984. – 528 с.
9. Симаков, К. В. Введение в теорию геологического времени. Становление. Эволюция. Перспективы / К. В. Симаков. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 1999. – 556 с.
10. Ida, S. Towards a deterministic model of planetary formation / S. Ida, D. N. C. Lin // *Astrophysical Journal*. – 2004. – Vol. 604. – № 1. – P. 388-413.
11. Varkonyi, Mono-monostatic bodies: the answer to Arnold's question / P. Varkonyi, G. Domokos // *Mathematical Intelligencer*. – 2006. – № 28(4). – P. 34-38.



Козин В. М., Земляк В. Л., Кожяев А. В.
V. M. Kozin, V. L. Zemlyak, A. V. Kozhaev

**ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЬДА НА ПАРАМЕТРЫ
РЕЗОНАНСНЫХ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН**

**INFLUENCE OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ICE
ON THE PARAMETERS OF RESONANT FLEXURAL-GRAVITY WAVES**

Козин Виктор Михайлович – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Механика деформирования» Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681005, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallургов, 1. E-mail: kozinvictor@rambler.ru.

Mr. Victor M. Kozin – Dr. habil. of Engineering, principal research associate, Institute of Engineering and Metallurgy, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681005, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 1 Metallurgists' str. E-mail: kozinvictor@rambler.ru.

Земляк Виталий Леонидович – кандидат физико-математических наук, проректор по науке и инновациям Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (Россия, Биробиджан); 679015, Еврейская автономная область, г. Биробиджан, ул. Широкая, 70а. E-mail: vellkom@list.ru.

Mr. Vitaly L. Zemlyak – Ph.D, vice-rector on scientific work and innovations of Priamursky state University named after Sholom-Aleichem (Russia, Birobidzhan); 679015, Jewish Autonomous region, Birobidzhan, 70a Shirokaya str. E-mail: kozinvictor@rambler.ru.

Кожяев Александр Владимирович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: alekzoid@gmail.com.

Mr. Alexander V. Kozhaev – Ph.D student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: alekzoid@gmail.com.

Аннотация. В данной статье рассматривается влияние изменения физико-механических свойств льда на параметры резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ). Отмечается целесообразность использования в расчётах как средних, общеизвестных значений наиболее вероятных характеристик льда, так и соответствующих конкретным ледовым условиям.

Summary. The influence of changes in the physicomachanical properties of ice on the parameters of resonant flexural-gravity waves (IGW) is considered. It is noted that it is expedient to use in the calculations both the average, well-known values of the most probable characteristics of ice, and those corresponding to specific ice conditions.

Ключевые слова: резонансные изгибно-гравитационные волны, физико-механические свойства льда, модель Кельвина – Фойгта, напряжённо-деформированное состояние.

Key words: resonant flexural-gravity waves, physical and mechanical properties of ice, Kelvin – Fought model, stress-strain state.

УДК 532.59:629.576

Работа выполнена за счёт средств гранта Российского научного фонда № 16-19-10097 «Исследование влияния ледовых условий на возможность всплытия подводных судов в ледяном покрове».

Введение

Многие экономически развитые страны имеют замерзающие реки, омываются морями, которые в различной степени и на разные сроки покрываются льдом. Лёд является серьёзным препятствием для судоходства, доставки грузов, добычи полезных ископаемых.

Одним из возможных способов решения данной проблемы может служить резонансный метод разрушения ледяного покрова [2].

При выполнении теоретических исследований часто используют наиболее вероятные значения физико-механических свойств льда. Однако состояние льда нестабильно и изменяется в зависимости от времени года, атмосферных условий и пр. Поэтому целесообразно исследовать, какие из физико-механических свойств льда оказывают значительное влияние на характер изгибно-гравитационных волн при изменении их в известных пределах, то есть при их отличии от наиболее вероятных величин.

Теоретические исследования влияния физико-механических свойств льда на параметры ИГВ

Колебания ледяного покрова рассматривались в линейной постановке. Лёд моделировался изотропной вязкоупругой пластиной бесконечной протяжённости, поведение которой описывалось моделью Кельвина – Фойгта [5]. Механическая модель приведена на рис. 1.

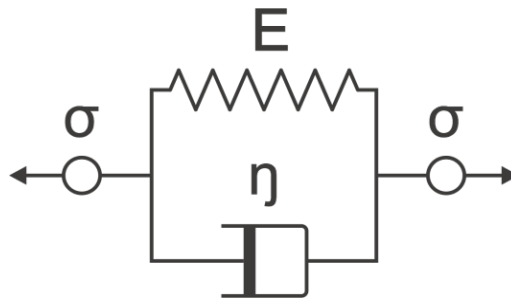


Рис. 1. Модель вязкоупругой среды Кельвина – Фойгта

В этом случае дифференциальное уравнение изгиба ледяного покрова имеет вид [1]

$$D \left(1 + \tau_f \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^4 w + \rho_i h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho_w g w + \rho_w \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \delta(x - vt, y) P(x, y, t); \quad (1)$$

потенциал движения жидкости Φ удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0; \quad (2)$$

граничные условия на дне водоёма и на границе лёд-вода:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=-H} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (4)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жёсткость пластины; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; w – прогиб льда; ρ_i, ρ_w – плотности льда и воды соответственно; P – нагрузка на лёд.

Применяя преобразование Фурье к дельта-функции, получим

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i[\lambda(x-vt)+\eta y]} d\lambda d\eta.$$

Потенциал движения жидкости Φ в соответствии с [5] имеет вид

$$\Phi = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\lambda\eta} ch \left[(H+z) \sqrt{(\lambda^2 + \eta^2)} \right] e^{-i[\lambda(x-vt)+\eta y]} d\lambda d\eta.$$

Функцию прогиба будем искать аналогично [1]:

$$w = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} w_{\lambda\eta} e^{-i[\lambda(x-vt)+\eta y]} d\lambda d\eta.$$

Применив оператор Гамильтона к функции прогиба w и с учётом условий (2), (3), (4), приняв $P = \text{const}$, $v = \text{const}$, получим [1]

$$w = \frac{P}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-i[\lambda(x-vt)+\eta y]}}{F(\lambda, \eta)} d\lambda d\eta,$$

где
$$F(\lambda, \eta) = D(\lambda^2 + \eta^2) + D\tau_{\phi} i\lambda v (\lambda^2 + \eta^2) - \rho_w g - \rho_i h v^2 \lambda^2 - \frac{\rho_w \lambda^2 v^2}{th \left(H \sqrt{(\lambda + \eta) \sqrt{\lambda + \eta}} \right)}.$$

Для нагрузки с прямоугольным основанием длиной $2a$, шириной $2b$ получим функцию прогиба [1]:

$$w = \frac{1}{\pi^2} \int_{-a}^{+a} \int_{-b}^{+b} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{q(\xi, \zeta) e^{-i[\lambda(x-\xi-vt)+\eta(y-\zeta)]}}{F(\lambda, \eta)} d\lambda d\eta d\xi d\zeta.$$

Преобразуя числитель по формуле Эйлера и исключая мнимую часть, окончательно получим [1]

$$w = \frac{-4P}{\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C(A \cos(\phi) - B \sin(\phi))}{\lambda \eta (A^2 + B^2)} d\lambda d\eta, \quad (5)$$

где

$$A = D(\lambda^2 + \eta^2)^2 + \rho_w g - \rho_i h v^2 \lambda^2 - \frac{\rho_w \lambda^2 v^2}{th \left(H \sqrt{\lambda^2 + \eta^2} \right) \sqrt{\lambda^2 + \eta^2}},$$

$$B = D\tau_{\phi} \lambda v (\lambda^2 + \eta^2)^2, \quad C = \cos(\eta y) \sin(\lambda b) \sin(\eta a), \quad \phi = \lambda(x - vt).$$

Сопоставление результатов численных расчётов с данными натуральных экспериментов [6] при принятых физико-механических параметрах льда, а именно: $\rho_i = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\rho_w = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

$\tau_f = 10 \text{ с}$; $\mu = \frac{1}{3}$; $E = 0,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $h = 0,075 \text{ м}$; $H = 6,8 \text{ м}$; $2a = 1,23 \text{ м}$; $2b = 0,48 \text{ м}$; $P = 406,5 \text{ Па}$ представлены на рис. 2. Направление движения нагрузки указано стрелкой, ось приложения нагрузки указана вертикальной линией.

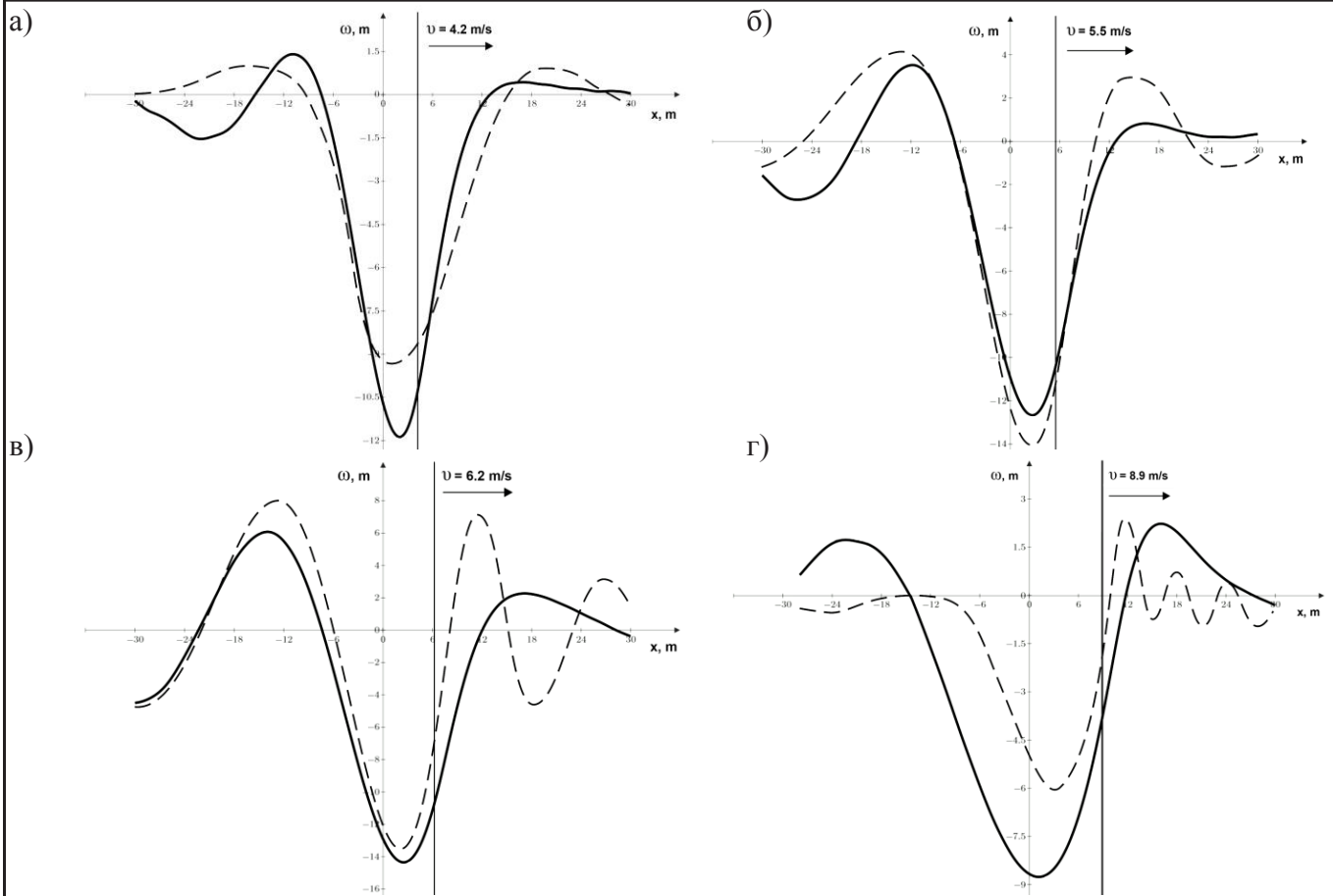


Рис. 2. Сопоставление численных расчётов с данными натуральных экспериментов

а) $v = 4,2$ м/с; б) $v = 5,5$ м/с; в) $v = 6,2$ м/с; г) $v = 8,9$ м/с

(-) – численный результат; (--) – натуральный эксперимент

Как видно из рис. 2, результаты численных расчётов удовлетворительно совпадают в области больших прогибов, то есть при возникновении наибольших напряжений.

Для полученной функции прогиба (5) выражения для погонных нормальных напряжений σ_x и σ_y будут иметь вид [4]

$$\sigma_x = \frac{6M_x}{h^2}; \quad \sigma_y = \frac{6M_y}{h^2}, \quad (6), (7)$$

где

$$M_x = -D \left(1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad (8)$$

$$M_y = -D \left(1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right). \quad (9)$$

Подставив (5) в уравнения (8) и (9), найдём соответствующие частные производные. Обозначив их за $F_i, i \in [1; 6]$, получим выражения для изгибающих моментов:

$$M_x = -D(F_1 + \mu F_2 + \tau_\phi(F_4 + \mu F_5)), \quad (10)$$

$$M_y = -D(F_2 + \mu F_1 + \tau_\phi(F_5 + \mu F_4)). \quad (11)$$

Влияние физико-механических свойств льда на параметры резонансных изгибно-гравитационных волн

Состояние льда характеризуют следующие физико-механические свойства: модуль Юнга E , коэффициент Пуассона μ и плотность ρ_i . В зависимости от времени года, атмосферных условий и прочего свойства льда изменяются соответствующим образом.

Известны наиболее вероятные физико-механические свойства льда, которые представлены в табл. 1 и 2 [3].

Таблица 1

Экстремальные и наиболее вероятные значения модуля Юнга

Метод измерения	Температура льда, °С	Модуль Юнга, МПа
Статический	[-3;-8]	2902,7684 – 4314,926
Резонансный	[0;-10]	8629,852 – 9953,74975
Сейсмический	[-5;-10]	6864,655 – 12258,3125
Наиболее вероятные значения:		3923 – 8620

Таблица 2

Наиболее вероятные значения плотности льда и коэффициента Пуассона

Лёд	Плотность, кг/м ³	Коэффициент Пуассона
Пресноводный	870 – 917	0,42 – 0,34
Морской	900 – 910	0,40 – 0,30

Рассмотрим влияние изменения указанных свойств льда на параметры ИГВ в пределах их наиболее вероятных значений. В качестве основных параметров выберем $\rho_i = 900 \text{ кг/м}^3$; $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$;

$$\tau_f = 10 \text{ с}; \mu = \frac{1}{3}; E = 5 \cdot 10^9 \text{ Па}; h = 0,5 \text{ м}; H = 5 \text{ м}; 2a = 30 \text{ м}; 2b = 13 \text{ м}; P = 3330 \text{ Па}; v = 7 \text{ м/с}.$$

Данные параметры соответствуют условиям проведения натуральных испытаний с использованием судна на воздушной подушке (СВП) «Мурена» [4].

Результаты теоретических исследований в диапазоне изменения крайних значений физико-механических свойств льда приведены на рис. 3–11.

При изменении модуля Юнга в диапазоне наиболее вероятных значений амплитуды ИГВ существенно изменяются, что показано на рис. 3. Как видно из рис. 3, при экстремальных значениях модуля Юнга наблюдаются значительные изменения амплитуды ИГВ.

Изменения коэффициента Пуассона и плотности льда практически не влияют на параметры ИГВ, что и показано на рис. 4 и 5.

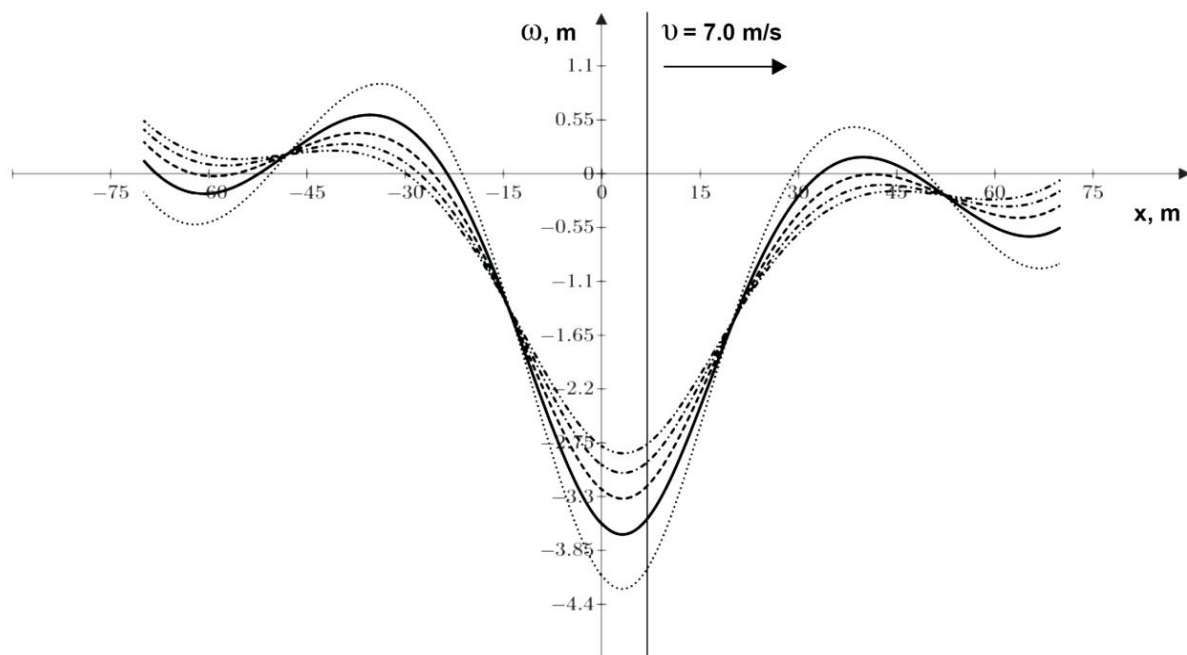


Рис. 3. Влияние изменения модуля Юнга на параметры ИГВ:
 (.....) – $E = 4000$ МПа; (—) – $E = 5000$ МПа;
 (---) – $E = 6000$ МПа; (-·-·-) – $E = 7500$ МПа; (-··-) – $E = 8500$ МПа

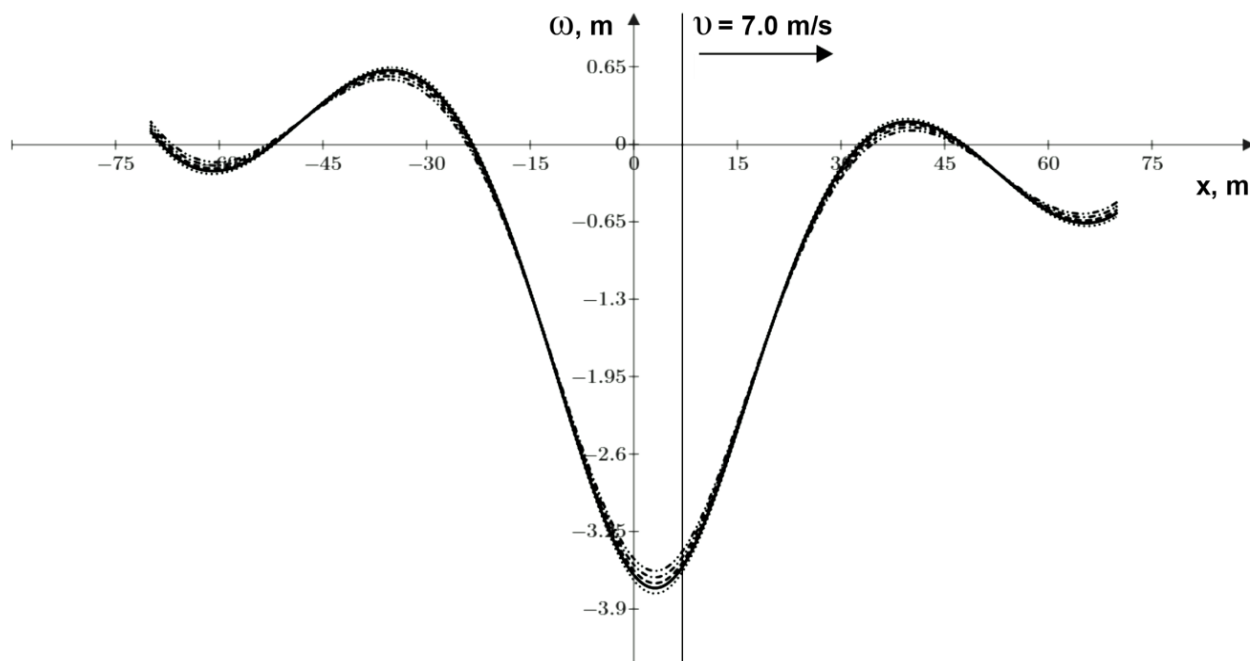


Рис. 4. Влияние изменения коэффициента Пуассона на параметры ИГВ:
 (.....) – $\mu = 0,3$; (—) – $\mu = 0,33$;
 (---) – $\mu = 0,36$; (-·-·-) – $\mu = 0,39$; (-··-) – $\mu = 0,42$

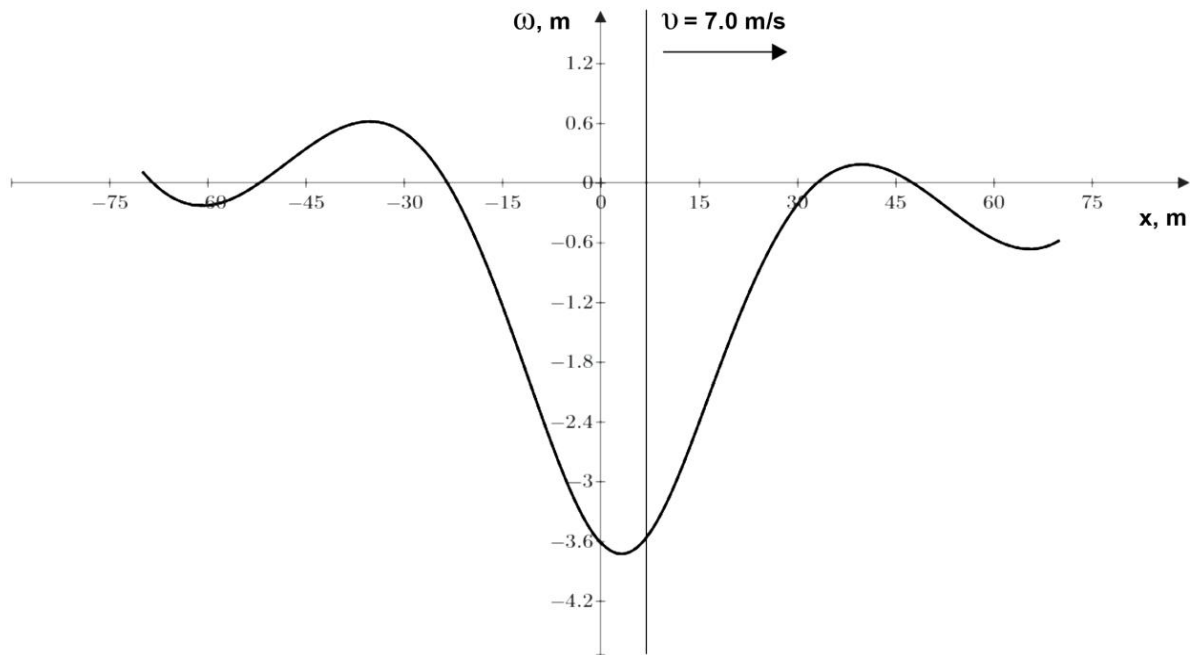


Рис. 5. Влияние изменения плотности льда на параметры ИГВ:

(.....) – $\rho_i = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (—) – $\rho_i = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
(- - -) – $\rho_i = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (- · -) – $\rho_i = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (- · · -) – $\rho_i = 950 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

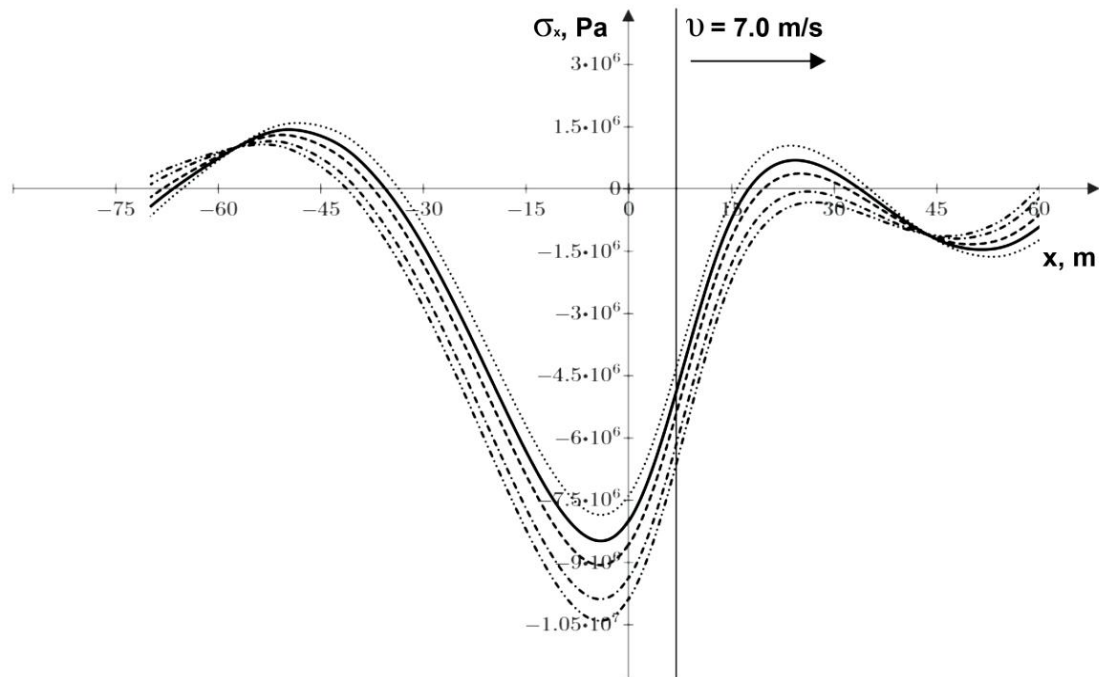


Рис. 6. Влияние изменения модуля Юнга на характер напряжения σ_x :

(- · · -) – $E = 4000 \text{ МПа}$; (- · -) – $E = 5000 \text{ МПа}$;
(- - -) – $E = 6000 \text{ МПа}$; (—) – $E = 7500 \text{ МПа}$; (.....) – $E = 8500 \text{ МПа}$

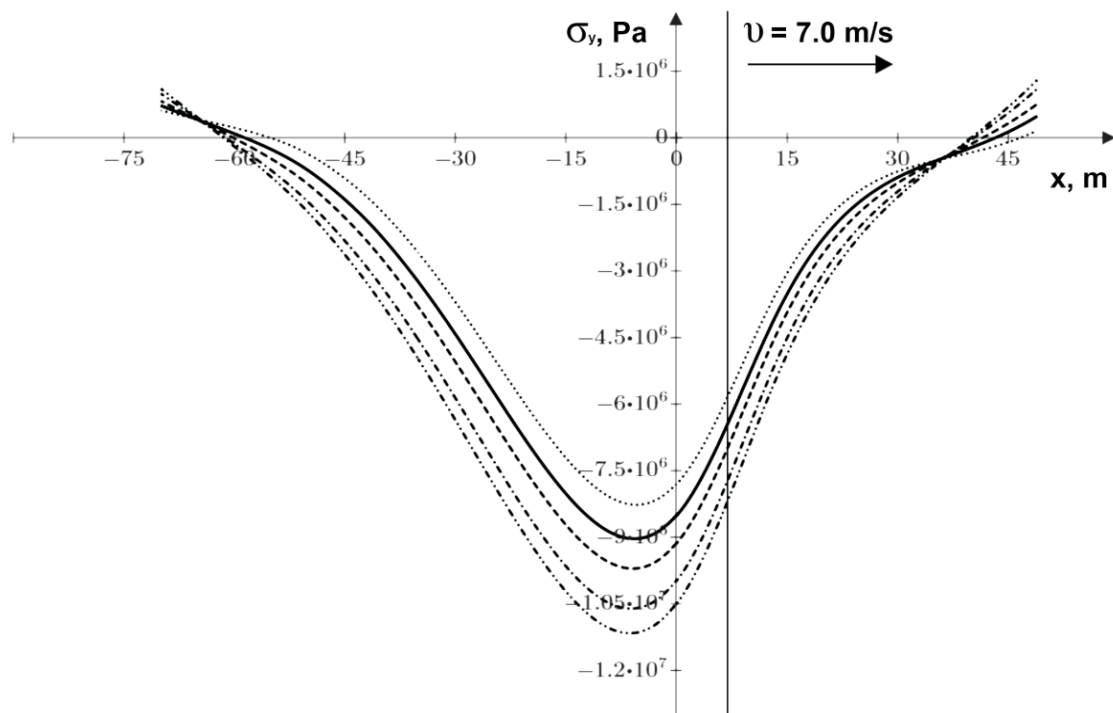


Рис. 7. Влияние изменения модуля Юнга на параметры напряжения σ_y :

(.....) – $E = 4000$ МПа; (—) – $E = 5000$ МПа;
 (---) – $E = 6000$ МПа; (-·-·) – $E = 7500$ МПа; (-·-·-) – $E = 8500$ МПа

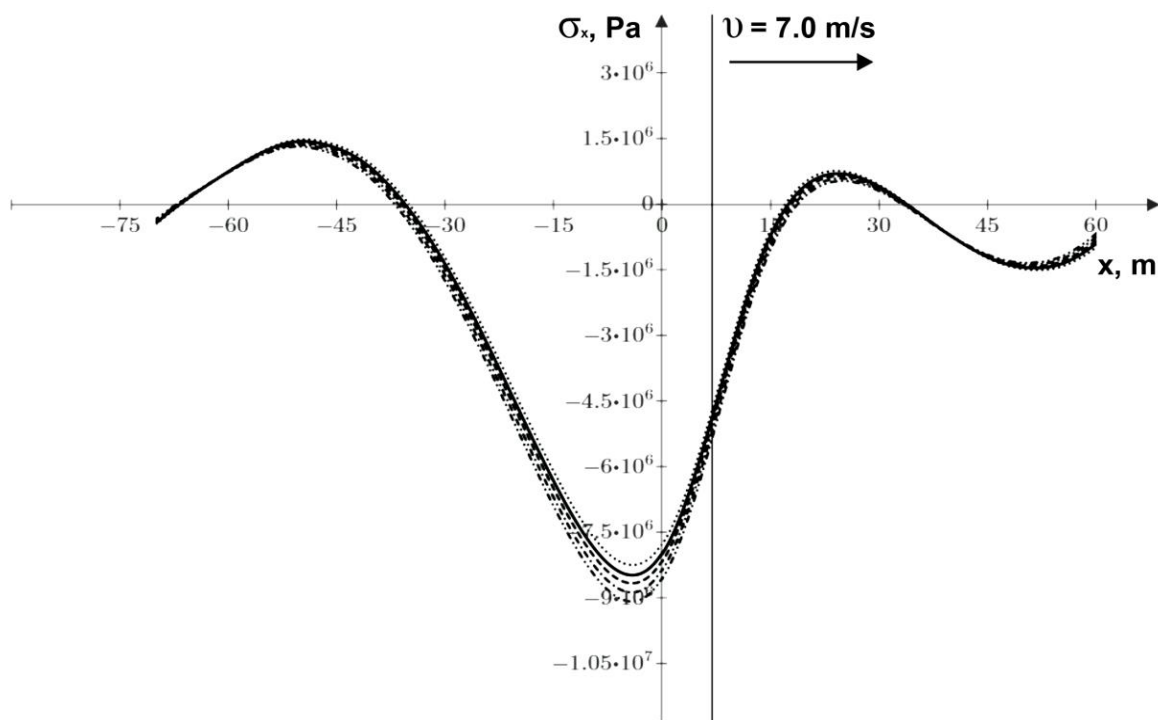


Рис. 8. Влияние изменения коэффициента Пуассона на параметры напряжения σ_x :

(.....) – $\mu = 0,3$; (—) – $\mu = 0,33$;
 (---) – $\mu = 0,36$; (-·-·) – $\mu = 0,39$; (-·-·-) – $\mu = 0,42$

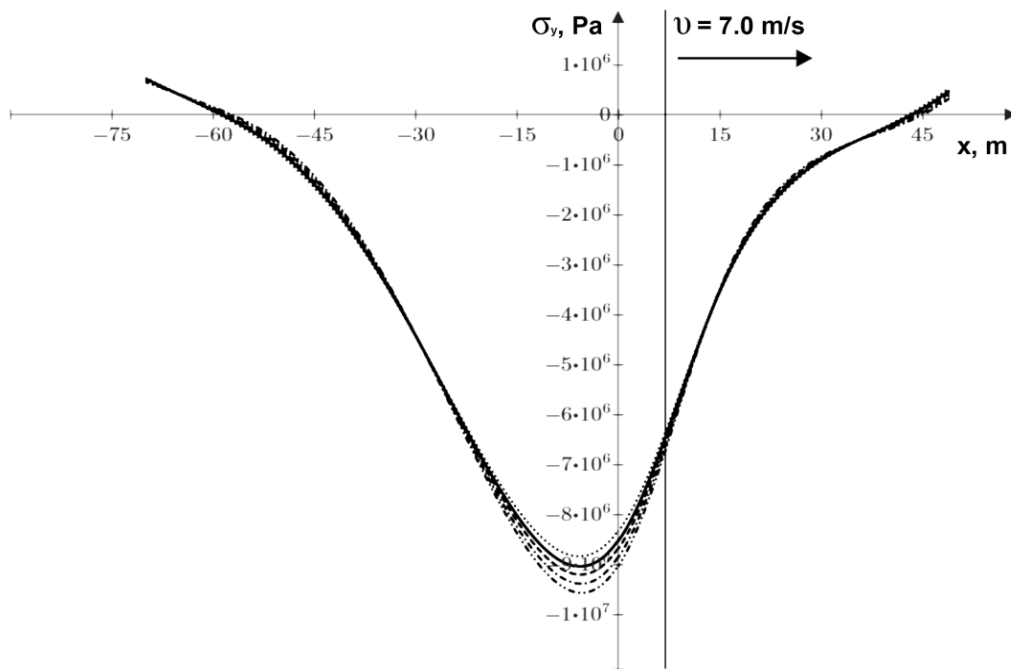


Рис. 9. Влияние изменения коэффициента Пуассона на параметры напряжения σ_y :

(.....) – $\mu = 0,3$; (—) – $\mu = 0,33$;
(---) – $\mu = 0,36$; (-·-·-) – $\mu = 0,39$; (-··-) – $\mu = 0,42$

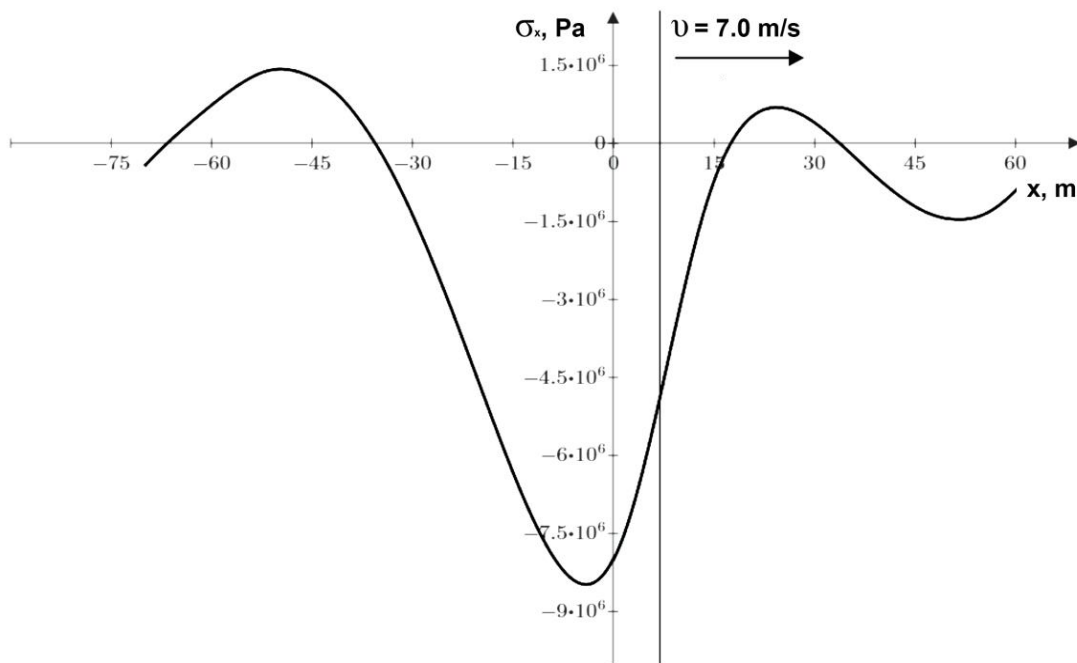


Рис. 10. Влияние изменения плотности льда на параметры напряжения σ_x :

(.....) – $\rho_i = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (—) – $\rho_i = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
(---) – $\rho_i = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (-·-·-) – $\rho_i = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; (-··-) – $\rho_i = 950 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

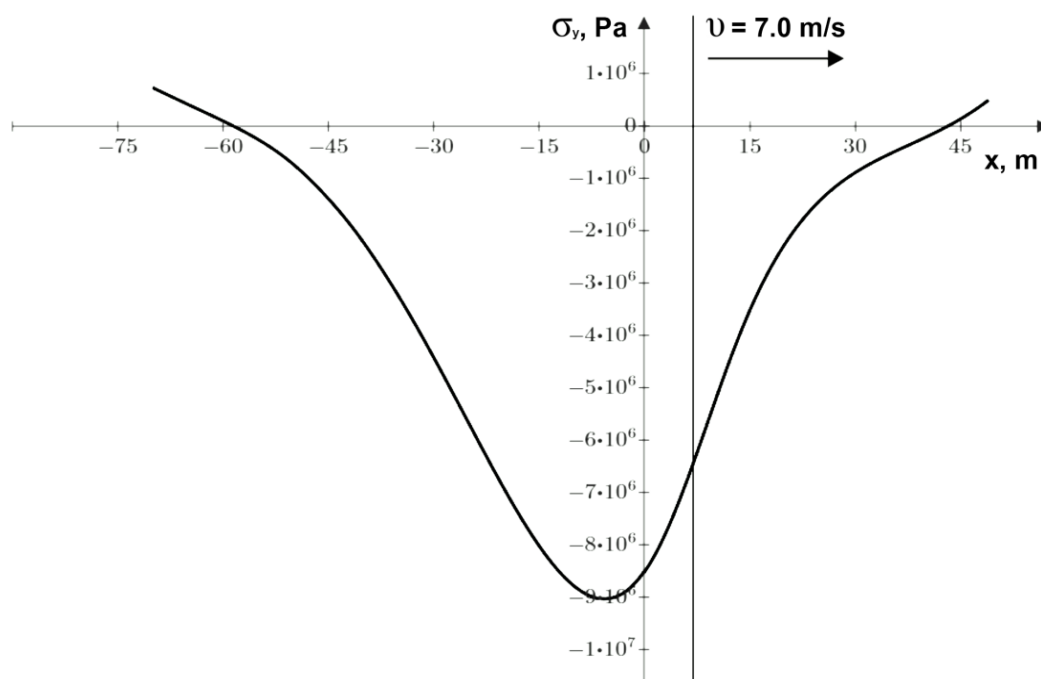


Рис. 11. Влияние изменения плотности льда на параметры напряжения σ_y :

$$\begin{aligned} & (\cdots) - \rho_i = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (—) - \rho_i = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \\ & (-\cdots) - \rho_i = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (-\cdot-) - \rho_i = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (-\cdots-) - \rho_i = 950 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \end{aligned}$$

Таким образом, при использовании СВП в качестве ледоразрушающей нагрузки резонансным методом необходимо учитывать влияние изменения только модуля Юнга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козин, В. М. Волновое сопротивление амфибийных судов на воздушной подушке при движении по ледяному покрову / В. М. Козин, А. В. Погорелова // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т. 44. – № 2. – С. 49-55.
2. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов / В. М. Козин, А. В. Онищук, Б. Н. Марьин [и др.]. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 191 с.
3. Петров, И. Г. Выбор наиболее вероятных значений физико-механических свойств льда / И. Г. Петров // Труды ААНИИ. – 1976. – Т. 331. – С. 4-41.
4. Прикладные задачи динамики ледяного покрова / В. М. Козин, В. Д. Жесткая, А. В. Погорелова [и др.]. – М.: Академия Естественных наук, 2008. – 329 с.
5. Хейсин, Д. Е. Динамика ледяного покрова. / Д. Е. Хейсин. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 215 с.
6. Takizawa, T. Deflection of a floating sea ice sheet induced by a moving load / T. Takizawa // Cold Regions Science and Technology. – 1985. – Vol. 11. – P. 123-139.

МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

Михалькова Л. А., Щетинин В. А., Ступин А. В., Сариллов М. Ю.
L. A. Mikhalkova, V. S. Shchetinin, A. V. Stupin, M. Yu. Sarilov

**ДИАГНОСТИКА ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ НЕФТЕПРОВОДА,
НАХОДЯЩЕГОСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ**

DIAGNOSTICS OF LINEAR PART OF OIL PIPELINE IN OPERATION

Михалькова Людмила Андреевна – студентка группы 4ОНБ-1 Института компьютерного проектирования машиностроительных технологий и оборудования Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: luda-mikhalkova@mail.ru.

Ms. Ludmila A. Mikhalkova – student group 4 NB-1 Institute of computer-aided design of engineering technologies and equipment of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: luda-mikhalkova@mail.ru.

Щетинин Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: schetynin@mail.ru.

Mr. Vladimir S. Shchetinin – Doctor of Engineering, professor of the Department of machines and apparatus of chemical production Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: schetynin@mail.ru.

Ступин Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: stupin-1959@mail.ru.

Stupin Alexander V. – PhD in Engineering, associate professor of machines and apparatus of chemical production Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: stupin-1959@mail.ru.

Сариллов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Sarilov Mikhail Urievich – Doctor of Engineering, professor of machines and apparatus of chemical production Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Аннотация. Статья посвящена исследованию способов диагностики линейной части нефтепровода, находящейся в эксплуатации. Был выполнен анализ различных вариантов решения поставленной задачи, изучены конструкции дефектоскопов. В данной статье определены технические задачи и намечены пути дальнейшего исследования в этой области.

Summary. The article is devoted to the study of methods for diagnosing the linear part of an oil pipeline in operation. An analysis of various options for solving the problem was performed, and the design of flaw detectors was studied. This article identifies technical challenges and outlines ways for further research in this area.

Ключевые слова: диагностика линейной части нефтепровода, методы диагностики, дефектоскоп, нефтепровод.

Key words: diagnostics of linear part of oil pipeline, methods of diagnosis, flaw detector, pipeline.

УДК 621.6

Нефтеперерабатывающая промышленность является одной из важных составляющих топливно-энергетического сектора экономики Российской Федерации. Нефть и нефтепродукты транспортируются разными способами: железнодорожным, морским, воздушным, автомобильным транспортом или по трубопроводу. Лидирующие позиции занимает трубопроводный транспорт углеводородов – почти 90 % добываемой в настоящее время нефти проходит по трубопроводам [1].

Общая протяжённость трубопроводов в России составляет более 217 тыс. км, причём на долю нефтяных приходится 46,7 тыс. км, газовых – 151 тыс. км [2]. Из общего числа отказов магистральных и промысловых нефтепроводов 28 % приходится на отказы, вызванные коррозионными повреждениями, 27 % – браком строительно-монтажных работ и 23 % – механическими повреждениями [3]. Следовательно, остро стоит вопрос разработки современных методов и средств технической диагностики состояния линейной части трубопровода для выявления и прогнозирования развития различных дефектов труб.

Основными технологическими элементами линейной части магистральных нефтепроводов (МНП) являются трубопроводы с ответвлениями и лупингами, запорная и регулирующая арматура, переходы через естественные и искусственные препятствия, узлы пропуска, пуска и приёма средств очистки и диагностирования (СОД) [4].

Безопасная эксплуатация линейной части МНП должна обеспечиваться периодическим патрулированием трассы нефтепровода; визуальным наблюдением для своевременного обнаружения опасных ситуаций, угрожающих целостности и безопасности нефтепровода и безопасности окружающей среды; комплексным обследованием с использованием средств технического диагностирования (СТД) для определения технического состояния (ТС) всех элементов линейной части МНП. Для оценки ТС линейной части МНП предусмотрены следующие виды технического диагностирования [5]:

- внутритрубное диагностирование (ВТД) в целях выявления дефектов геометрии трубопроводов, дефектов стенки трубы и сварных швов;
- наружное диагностирование методами НК для обследования элементов линейной части МНП, на которых из-за конструктивных особенностей не проводят ВТД;
- электрометрическое диагностирование (ЭД) для оценки состояния изоляционного покрытия, определения коррозионного состояния линейной части МНП, причины и скорости коррозии, оценки состояния средств электрохимической защиты (ЭХЗ).

При невозможности проведения ВТД определение ТС трубопровода осуществляют на следующих основаниях:

- анализа технической документации на трубопровод;
- обследования коррозионного состояния и состояния противокоррозионной защиты трубопровода;
- обследования трубопровода методом акустико-эмиссионного контроля (АЭК);
- проведения дополнительного дефектоскопического контроля (ДДК) на участках трубопроводов с потенциальными дефектами стенки трубы, сварных швов, изоляционного покрытия по результатам АЭК и обследования коррозионного состояния трубопровода;
- проведения визуального и измерительного контроля (ВИК);
- проведения ультразвукового контроля (УЗК);
- проведения ультразвуковой толщинометрии (УТ);
- проведения магнитопорошкового контроля (МК);
- проведения капиллярного контроля.

Внутритрубное диагностирование осуществляется прогоном внутритрубного дефектоскопа по трубопроводу за счёт давления потока жидкости или газа, транспортируемого по нему. Разработчиками внутритрубных инспекционных приборов являются такие компании, как ООО «НПЦ “Внутритрубная диагностика (ВТД)”» [6], АО «Транснефть – Диаскан» [7], ООО «Апродит» [8], ROSEN [9]. Во внутритрубных дефектоскопах реализована магнитная и ультразвуковая дефектоскопия.

Магнитный метод внутритрубной диагностики основан на регистрации магнитных полей рассеяния, образующихся при намагничивании стенки трубопровода. Суть метода в том, что при наличии дефекта в стенке трубопровода часть магнитного потока рассеивается на дефекте, что регистрируется датчиком, расположенным вблизи поверхности трубопровода. Намагничивание стенки трубопровода обеспечивается постоянными магнитами, размещёнными на цилиндрическом яреме, и гибкими металлическими щётками, передающими магнитный поток от магнитов в стенку



трубы. Магнитные дефектоскопы осуществляют продольное (MFL) или поперечное намагничивание (TFI).

Дефектоскопы продольного намагничивания MFL позволяют обнаруживать и регистрировать:

- коррозионные дефекты (общую коррозию, каверны, язвы);
- механические повреждения поперечной ориентации;
- поперечные металлургические дефекты;
- поперечные стресс-коррозионные трещины;
- дефекты кольцевых (монтажных) сварных швов.

Дефектоскопы поперечного намагничивания TFI в отличие от дефектоскопов MFL позволяют обнаруживать и регистрировать продольно ориентированные дефекты. За счёт применения как продольного, так и поперечного намагничивания комбинированные магнитные дефектоскопы (MFL+TFI) позволяют более эффективно и точно обнаруживать различные типы дефектов.

Магнитные внутритрубные интроскопы типа MFL+ способны выявить с фотографической точностью все дефекты любой ориентации на внутренней поверхности стенок труб, включая дефекты геометрии трубопровода. Точность обнаружения дефектов и оценки их размеров на внутренней поверхности труб не зависит от толщины стенок труб.

Диагностический комплекс нового поколения «Дефектоскоп ультразвуковой 28-ДКП.00-00.000» компании АО «Транснефть – Диаскан» [7], предназначенный для многоракурсного исследования стенки трубопроводов диаметром 28"/32", оснащён ультразвуковой измерительной системой, включающей датчики типа CD и WM. В нём впервые применены датчики типа CD, которые имеют несколько углов ввода ультразвукового сигнала в стенку трубы. Использование данных датчиков позволяет получать дополнительную информацию о дефектах в продольном и поперечном направлениях, в том числе и в сварных швах. По сравнению с предыдущими аналогами, в диагностическом комплексе улучшена разрешающая способность измерительной системы WM с 5 мм до 3 мм за счёт увеличения количества датчиков в 1,5 раза.

При внутритрубной диагностике применяют комбинированные магнитно-ультразвуковые дефектоскопы (MFL+WM+CD), позволяющие за один прогон проводить магнитную (MFL) и ультразвуковую (WM и CD) диагностику трубопровода на потери металла и наличие трещин продольной и поперечной ориентации. Это позволяет эффективно сочетать преимущества обоих методов.

Недостаток ультразвуковой дефектоскопии в том, что она требует наличия контактной жидкости для обеспечения акустического контакта между датчиками и контролируемой поверхностью. Это является причиной малой эффективности данных дефектоскопов при инспекции магистральных газопроводов. Данная проблема решается с помощью магнитоакустической внутритрубной диагностики, основанной на электромагнито-акустическом (ЭМА) способе возбуждения и приёма ультразвуковых сдвиговых колебаний в металле контролируемого трубопровода, позволяющем проводить диагностику без применения контактной жидкости.

Магнитоакустические дефектоскопы предназначены:

- для выявления зон различно ориентированных трещин на ранней стадии развития в основном металле и сварных швах;
- регистрации дефектов потери металла и расслоений, оценки их глубины акустическим методом, мониторинга роста коррозионных дефектов;
- определения типа и оценки состояния наружного изоляционного покрытия.

Комбинированные магнитоакустические дефектоскопы серии ДМТ(Б)-А и ДМТП(Б)-А компании ООО «НПЦ “Внутритрубная диагностика (ВТД)”» [6], совмещающие в себе магнитные датчиковые подсистемы сверхвысокого разрешения и многоракурсные ультразвуковые датчиковые подсистемы ЭМА, выдают максимально достоверную информацию о состоянии трубопровода. Отсутствие необходимости в жидкостном контакте ЭМА-преобразователей позволяет равноценно использовать комбинированные магнитоакустические дефектоскопы для контроля нефте- и газопроводов.

На практике часто применяют телескопическую конструкцию трубопроводов (с разными диаметрами). Такие трубопроводы нередко классифицируются как неспособные к поточному кон-

тролю из-за их различного диаметра. Благодаря использованию технологии Multi Diameter Technology компании ROSEN [9], можно значительно сократить расходы и время на проведение внутритрубной инспекции трубопровода. Ключевым элементом технологии ROSEN являются самоцентрирующиеся диагностические снаряды. Различные диаметры приводят к разным перепадам давления и расходам. В этой ситуации условия плавного запуска могут быть достигнуты благодаря технологии управления скоростью компании ROSEN, реализованной в тяговом блоке дефектоскопа (см. рис. 1).

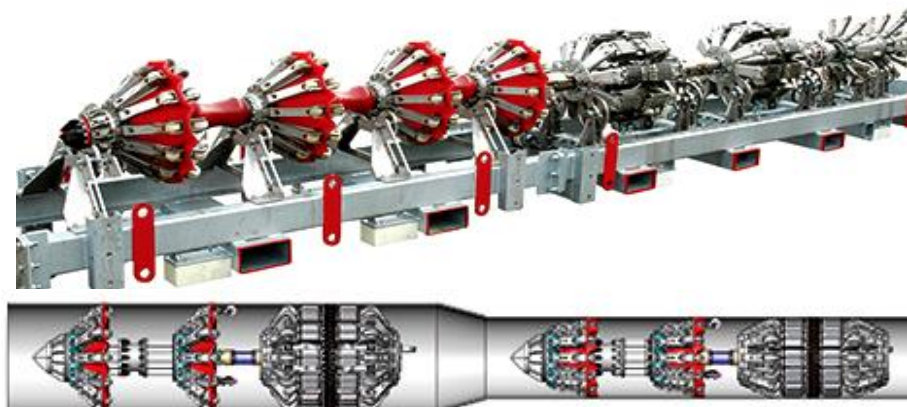


Рис. 1. Внутритрубный дефектоскоп компании ROSEN для контроля телескопических трубопроводов

При внутритрубной диагностике могут возникнуть и другие трудности: невозможность определения места расположения дефекта при испытании сложных, имеющих многослойную структуру изделий; затруднённое прохождение дефектоскопом крутых поворотов трубопровода малого диаметра; недостаточные надёжность и точность в работе; отсутствие стабилизации скорости снаряда и прочие. На практике применяется множество различных конструкций дефектоскопов, поэтому для более глубокого изучения проблем, связанных с работой данных устройств, проводился патентный поиск. В частности, известна конструкция внутритрубного дефектоскопа (см. рис. 2) [10], относящаяся к области контроля технического состояния нефтепроводов и газопроводов. Процесс диагностирования в данном случае осуществляется прогоном данного устройства внутри трубопровода за счёт давления потока нефти или нефтепродуктов, которые транспортируются по трубопроводу. Данное изобретение решает проблему прохождения дефектоскопом крутых поворотов трубопровода малого диаметра благодаря использованию упругого карданного механизма для соединения секций дефектоскопа, а также повышению степени его надёжности в работе по сравнению с аналогами.

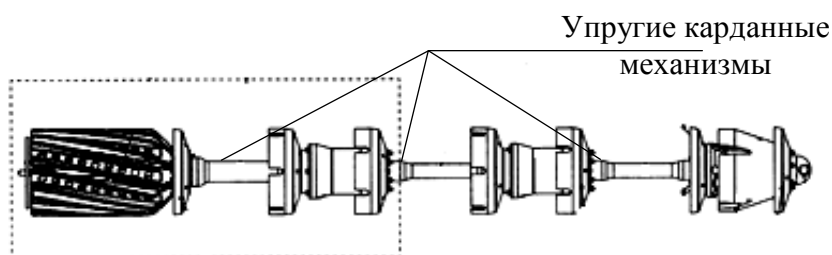


Рис. 2. Эскиз внутритрубного дефектоскопа

Известна конструкция магнитного проходного дефектоскопа (см. рис. 3) [11], относящаяся к области неразрушающего контроля, которая может быть использована для выявления продольных трещин в заглублённых магистральных трубопроводах. Данное изобретение обеспечивает надёжность работы дефектоскопа и достоверность контроля при выявлении продольных трещин на заглублённых в земле трубопроводах, стресс-коррозии на ранней стадии развития, дефектов металлургического производства и коррозионного повреждения.

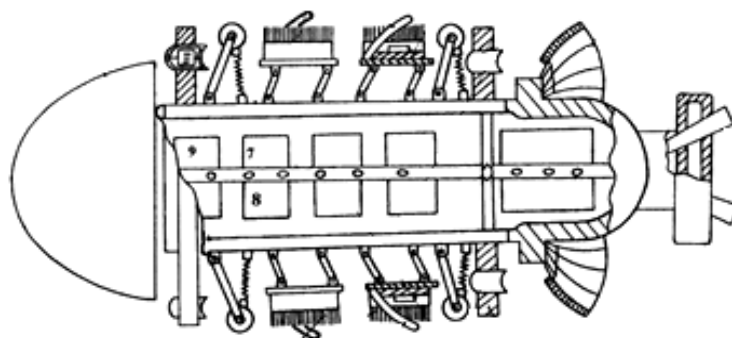


Рис. 3. Эскиз магнитного проходного дефектоскопа

Была также рассмотрена и конструкция внутритрубного прибора-дефектоскопа с изменяемой скоростью движения (см. рис. 4) [12], которая относится к устройствам неразрушающего контроля дефектов стенок магистральных трубопроводов. Изобретение обеспечивает повышение точности дефектоскопии магистральных трубопроводов за счёт повышения точности измерения и стабилизации скорости прибора и упрощения конструкции прибора-дефектоскопа без снижения эффективности перепуска газа.

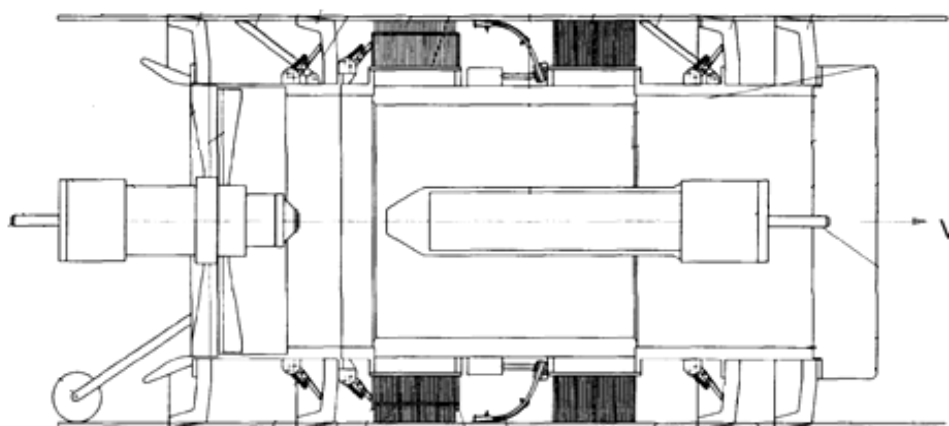


Рис. 4. Эскиз внутритрубного прибора-дефектоскопа с изменяемой скоростью движения

На основе анализа вышеизложенного материала можно заключить, что до сих пор не был разработан дефектоскоп, который смог бы решить сразу весь комплекс диагностики трубопроводов или выявить большую часть дефектов. Данное обстоятельство обуславливает проведение дальнейших исследований для поиска решения данного вопроса.

В настоящее время в КнАГУ проводятся исследования в направлении разработки методов для диагностирования линейной части трубопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Транснефть. Способы транспортировки нефти [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://discoverrussia.interfax.ru/wiki/22/>.
2. SYL. Трубопроводный транспорт в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.syl.ru/article/198269/new_truboprovodnyiy-transport-v-rossii.
3. Нефть и газ Сибири. Анализ основных причин аварий, произошедших на магистральных газопроводах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://sib-ngs.ru/journals/article/313#modal_w.
4. ГОСТ Р 55435-2013. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Эксплуатация и техническое обслуживание. Основные положения. – Введ. 2013-11-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 49 с.
5. ГОСТ Р 54907-2012. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование. Основные положения. – Введ. 2012-05-24. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.
6. Научно-производственный центр. Внутритрубная диагностика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.npcvtd.ru/>.
7. АО «Транснефть – Дискан» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://diascan.transneft.ru>.
8. Апродит. Оборудование для очистки и диагностики трубопровода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aprodit.ru>.
9. ROZEN. Empwered by technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.rosen-group.com.
10. Пат. 66479 Российская Федерация, МПК⁷ F17D. Внутритрубный дефектоскоп / И. А. Хитрик, С. Н. Чужинов, Н. Н. Пекарников [и др.]. – заявл. 19.04.07; опубл. 10.09.07 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://poleznayamodel.ru/model/6/66479.html>.
11. Пат. 2144182 Российская Федерация, МПК⁸ G01N27/87. Магнитный проходной дефектоскоп / В. В. Клюев, Г. А. Жукова, Л. А. Хватов; патентообладатель закрытое акционерное общество «МНПО «Спектр»»; заявл. 08.10.98; опубл. 10.01.00.
12. Пат. 2361198 Российская Федерация, МПК⁸ G01N27/87. Внутритрубный снаряд-дефектоскоп с изменяемой скоростью движения / Ю. В. Чеботаревский, А. И. Синев, П. К. Плотников [и др.]; патентообладатель Саратовский государственный технический университет (СГТУ), закрытое акционерное общество «Газприборавтоматикасервис» (ГПАС). – № 2008101340/28; заявл. 09.01.08; опубл. 10.07.09. Бюл. № 19. – 20 с.



Сариллов М. Ю., Лисков П. А., Жмак М. Д.
M. Yu. Sarilov, P. A. Liskov, M. D. Zhmak

**ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКОВ-ОТРАЖАТЕЛЕЙ И РЕЗЕРВУАРОВ-ГАЗГОЛЬДЕРОВ
С ЦЕЛЬЮ СОКРАЩЕНИЯ ПОТЕРЬ НЕФТЕПРОДУКТОВ ИЗ РЕЗЕРВУАРОВ**

**APPLICATION OF DISK-REFLECTORS AND TANKS-GAZGOLDER WITH
THE PURPOSE OF REDUCING THE LOSS OF OIL PRODUCTS FROM TANKS**

Сариллов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – D. Sc. in engineering, Head of the Department of Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Лисков Павел Андреевич – магистрант кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: pasha.liskov.95@mail.ru.

Mr Pavel A. Liskov – master's degree student Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: pasha.liskov.95@mail.ru.

Жмак Максим Дмитриевич – магистрант кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maxim_zhmak_95@mail.ru.

Mr Maxim D. Zhmak – master's degree student Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maxim_zhmak_95@mail.ru.

Аннотация. В данной работе рассматривается проблема потерь нефтепродуктов при их хранении в резервуарных парках нефтеперерабатывающих заводов; кратко рассмотрены причины потерь нефтепродуктов из резервуаров. Для решения данной проблемы предложены два способа сокращения потерь с описанием предлагаемых технологий. Первый способ состоит в применении недорогих дисков-отражателей, второй – в улавливании паров нефтепродукта путём создания комплекса газоуравнительной системы с использованием мягких резервуаров-газгольдеров. Произведён экономический расчёт при внедрении данных технологических решений.

Summary. This paper deals with the problem of oil products losses during their storage in tanks. The authors briefly discuss the reasons of oil losses out of the tanks. The ways to reduce losses are proposed and described in the article. The economic calculation for the implementation of these technological solutions is given.

Ключевые слова: нефтепродукты, потери, резервуары, сокращение, газоуравнительная система, диски-отражатели, бензин.

Key words: petroleum products, losses, tanks, heat reduction, gas equalizing system, wheels reflectors, petrol.

УДК 650.98

Введение

Борьба с потерями нефти и нефтепродуктов при их хранении в резервуарах на нефтебазах – это один из важных путей экономии топливных и энергетических ресурсов на нефтеперерабатывающем предприятии. За последнее время основано много мероприятий, на которых объём потерь нефтепродуктов значительно снижен. Несмотря на принимаемые меры, при транспортировании, хранении и сливно-наливных операциях теряется около 2 % объёма всей добываемой в стране нефти. Особенно велики потери испарения легкоиспаряющихся нефтепродуктов (бензин, дизельное топливо), хранимых в резервуарных парках предприятия [1]. Каковы причины потерь?

1. От вентиляции газового пространства: потери происходят через открытые люки резервуаров посредством простого выдувания бензиновых паров ветром.

2. Потери от больших «дыханий» происходят в результате вытеснения закачиваемым нефтепродуктом паров хранимого в резервуаре нефтепродукта из газового пространства резервуара.

3. Потери от «обратного выдоха» происходят таким образом: вошедший в резервуар воздух начинает насыщаться парами нефтепродукта, и спустя некоторое время из резервуара может произойти выход насыщающейся газовой смеси.

4. Потери происходят от насыщения газового пространства.

5. Потери от «малых дыханий» происходят от суточного колебания температуры и от расширения паровоздушной смеси.

Все известные методы сокращения потерь нефтепродуктов из резервуаров можно разделить на пять групп:

1) сокращение объёма газового пространства резервуара: достигается применением различных покрытий – слоя микрошариков из пластмасс, плавающих защитных эмульсий, понтонов и плавающих крыш;

2) хранение нефтепродуктов под избыточным давлением – уменьшается амплитуда колебания температуры газового пространства резервуара;

3) уменьшение амплитуды колебания температуры газового пространства резервуара посредством окраски его лучеотражающими покрытиями; применение тепловой изоляции, водяное орошение, экранирование резервуара;

4) улавливание паров нефтепродуктов посредством применения газоуравнительной системы (ГУС), газовой обвязки резервуаров и системы улавливания лёгких фракций (УЛФ);

5) организационно-технические мероприятия: подготовка высококвалифицированных кадров, хранение нефтепродуктов при максимально возможных взливах, поддержание в исправном состоянии самих резервуаров и дыхательного оборудования и т. д. [2].

В данной работе предлагаются два способа сокращения потерь нефтепродуктов из резервуаров: применение недорогих дисков-отражателей и улавливание паров нефтепродукта путём создания комплекса газоуравнительной системы с использованием мягких резервуаров-газгольдеров (газгольдеров-накопителей).

Применение дисков-отражателей

Диски-отражатели предназначены для уменьшения потерь нефтепродуктов при сбросе дыхательными клапанами избыточного давления в резервуарах с нефтью и нефтепродуктами.

Механизм сокращения потерь состоит в том, что диск-отражатель, подвешенный под монтажным патрубком дыхательного клапана, не даёт струе входящего в резервуар воздуха свободно распространяться вглубь газового пространства, изменяет её направление с вертикального на почти горизонтальное. Поэтому перемешивание паровоздушной смеси в основном происходит в слоях, примыкающих к кровле резервуара. Наиболее насыщенные слои газового пространства, расположенные у поверхности продукта, почти не участвуют в процессе конвективного перемешивания. Таким образом, диск-отражатель уменьшает концентрацию паров и потери от испарения.

По данным исследований Института проблем транспорта энергоресурсов республики Башкортостан (ИПТЭР) и Управления научными исследованиями (УНИ), среднегодовая эффективность дисков-отражателей для сокращения потерь составляет 25 % от потерь при «больших дыханиях» резервуаров.

Преимущества: малозатратное решение (40 тыс. р. за 1 ед.), лёгкость монтажа и демонтажа, длительный срок эксплуатации, установка на любой резервуар без необходимости его переоборудования.

Недостатки: низкая среднегодовая эффективность дисков-отражателей для сокращения потерь по сравнению с другими способами.

Схема диска-отражателя представлена на рис. 1. Диск устанавливается под монтажным патрубком дыхательного клапана с соответствующим условным проходом. Отражатель состоит

из стойки 3, фланца 12, раскладывающегося диска, основания 1, крыла 2 и крыла среднего 11, а также осей 4, 6 и петли 5.

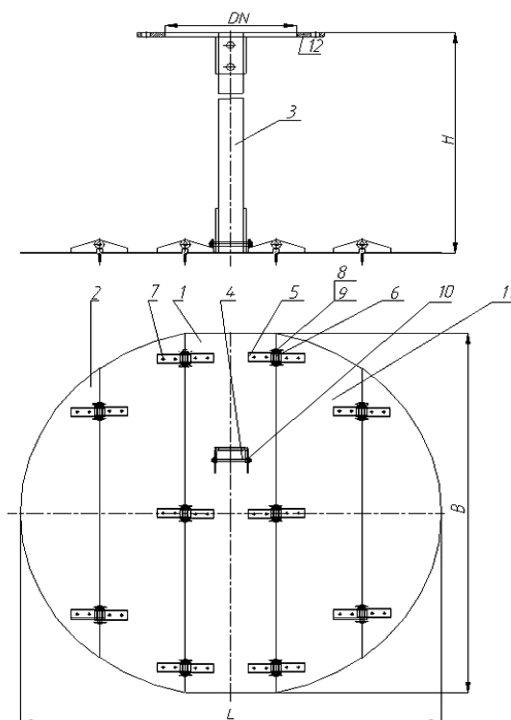


Рис. 1. Схема диска-отражателя

Для нормального функционирования диска-отражателя при монтаже необходимо расположить его концентрично с горизонтальным сечением монтажного патрубка.

Технологические параметры оборудования и экономический эффект при внедрении
Технические характеристики диска-отражателя описаны в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики диска-отражателя

Параметр	Значение					
	100	150	200	250	350	500
Условный проход (ДУ), мм	100	150	200	250	350	500
Высота монтажного патрубка не более, мм	400		500			
Габаритные размеры						
D открытого ОТР, мм	250	350	350	500	630	650
D закрытого ОТР, мм	60	136	140	250	360	444
Высота открытого ОТР, мм	680				850	1222
Масса, кг	4		5	6	8	11

Рассчитаем экономический эффект. Для расчёта возьмём бензиновую и керосиновую фракции при хранении в резервуарах в тёплое время года (апрель – сентябрь).

Допустим, что каждый день из резервуарного парка в среднем отгружается:

- 1) от 1100 т бензина АИ-92;
- 2) 866 т авиакеросина;
- 3) 133 т бензина АИ-95;
- 4) 1333 т прямогонного бензина.

Потери нефтепродуктов от испарения из резервуаров с данными нефтепродуктами определяются суммированием потерь за 6 наиболее тёплых месяцев:

$$\Pi_{\text{рез}} = V_{\text{кв}} \cdot \frac{P_{\text{нас}}}{P_{\text{атм}}} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot 10^{-6}, \text{ т},$$

где $V_{\text{кв}}$ – объём нефтепродукта, поступающего в группы резервуаров за апрель – сентябрь;
 $\frac{P_{\text{нас}}}{P_{\text{нас}}} = \frac{550 \text{ мм рт. ст.}}{757,6 \text{ мм рт. ст.}} = 0,73$; K_1 – опытный коэффициент, характеризующий удельные потери углеводородов с учётом среднеквартальной оборачиваемости резервуаров, $K_1 = 0,1$; K_2 – коэффициент, учитывающий наличие технических средств сокращения потерь от испарения и режим эксплуатации резервуара, $K_2 = 1,1$; K_3 – коэффициент, учитывающий влияние климатических условий на испарение, $K_3 = 1,14$.

Рассчитаем плотность паров нефтепродуктов в газовом пространстве резервуара или среднеквартальной температуре газового пространства, кг/м^3 :

$$P_{\text{ср}} = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{P_{\text{атм}}}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_{\text{ср}}},$$

$$P_{\text{ср}} = \frac{61,75 \text{ г/моль}}{22,4 \text{ л/моль}} \cdot \frac{755}{760} \cdot \frac{273}{273 + 26,5} = 2,5 \text{ кг/м}^3,$$

где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление на момент вычислений, $P_{\text{атм}} = 755 \text{ мм рт. ст.}$; P_0 – атмосферное давление, $P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$; M – молекулярная масса; T_0 – 273 К.

Молекулярная масса M определяется по формуле

$$M = 60 + 0,3 \cdot (t_{\text{нк}} - 30) + 0,001 \cdot (t_{\text{нк}} - 30)^2$$

$$M = 60 + 0,3 \cdot (35 - 30) + 0,001 \cdot (35 - 30)^2 = 61,75 \text{ г/моль},$$

где $t_{\text{нк}}$ – температура начала кипения нефтепродукта.

Значение среднеквартальной температуры газового пространства резервуара, необходимой для определения давления насыщенных паров $P_{\text{нас}}$, будет таким:

$$t_{\text{ср}} = 0,7 \cdot t_{\text{н}} + 0,3 \cdot t_{\text{в}}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{ср}} = 0,7 \cdot 25 + 0,3 \cdot 30 = 28,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В расчётах используется 25%-е сокращение потерь диска-отражателя. Бензин АИ-92:

$$\Pi_{\text{резервуаров за 6 мес.}} = 262200 \text{ м}^3 \cdot 0,73 \cdot 2,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,1 \cdot 1,1 \cdot 1,14 = 60200 \text{ кг} = 60,2 \text{ т}.$$

Тоннаж уловленного диском-отражателем нефтепродукта составит 15 000 кг. Бензин АИ-95:

$$\Pi_{\text{резервуара за 6 мес.}} = 32000 \text{ м}^3 \cdot 0,73 \cdot 2,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,1 \cdot 1,1 \cdot 1,14 = 7323 \text{ кг} = 7,3 \text{ т}.$$

Тоннаж уловленного диском-отражателем нефтепродукта составит 1830 кг. Прямогонный бензин:



$$P_{\text{резервуара за 6 мес.}} = 331000 \text{ м}^3 \cdot 0,73 \cdot 2,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,1 \cdot 1,1 \cdot 1,14 = 75758 \text{ кг} = 75,7 \text{ т.}$$

Тоннаж уловленного диском-отражателем нефтепродукта составит 18 939 кг. Авиакеросин:

$$P_{\text{резервуара за 6 мес.}} = 200000 \text{ м}^3 \cdot 0,73 \cdot 2,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,1 \cdot 1,1 \cdot 1,14 = 45771 \text{ кг} = 45,7 \text{ т.}$$

Тоннаж уловленного диском-отражателем нефтепродукта составит 11 442 кг.

По результатам расчётов потерь видно, что данный проект позволит нам улавливать большой объём испаряющихся паров бензина, а это 15 тонн 92-го, 2 тонны 95-го, 19 тонн БГС, 11,5 тонны авиакеросина. Учитываем, что продажа одной тонны 92-го бензина обходится в 28 585 р., 95-го – в 29 802 р., прямогонного – в 22 075 р., авиакеросина – в 22 357 р.; экономия составит 1 163 000 р.

В качестве исходных данных бралась средняя стоимость выбранного оборудования, стоимость работ по проектированию, установке.

Сводный сметный расчёт представлен в табл. 2.

Таблица 2

Сводный сметный расчёт

Наименование	Количество	Стоимость единицы, р.	Общая стоимость, р.
Диск-отражатель	100	40 000	4 000 000
Расходы на монтажные работы – 25 %			1 000 000
Расходы на запчасти – 2 %			80 000
Расходы на транспорт – 5 %			180 000
Расходы на комплектацию – 1,5 %			60 000
Заготовительно-складские расходы – 1,2 %			48 000
Итого по разделу			5 368 000

Экономический расчёт показывает, что затраты на оборудование с монтажными работами составят 5,3 млн р. Первый год будет рассчитан на разработку, закупку, установку дисков-отражателей, а прибыль рассматриваем со следующего года.

Распределение вложения и прибыли по годам показаны в табл. 3.

Таблица 3

Распределение вложения и прибыли по годам

Год	2018	2019	2020	2021	2022
Затраты на оборудование	5,3 тыс. р.	–	–	–	–
Стоимость сэкономленного нефтепродукта	–	1163 тыс. р.	1163 тыс. р.	1163 тыс. р.	1163 тыс. р.
Прибыль		1163 тыс. р.	1163 тыс. р.	1163 тыс. р.	1163 тыс. р.

Экономический эффект отражён в виде графика точки окупаемости проекта (см. рис. 2).

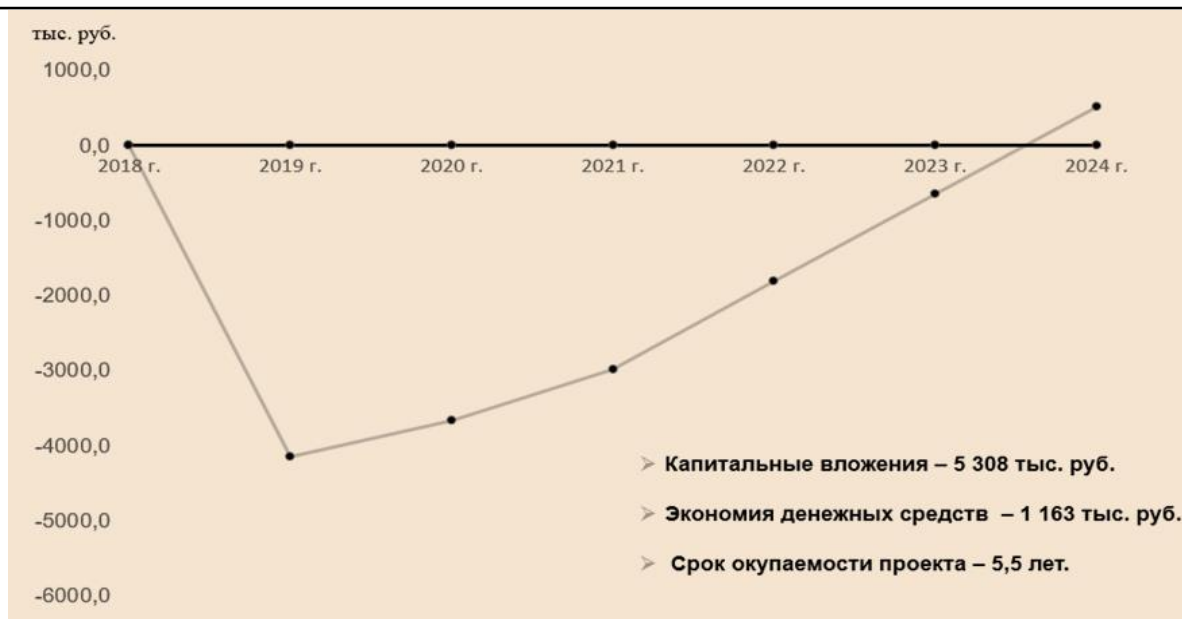


Рис. 2. График точки окупаемости проекта

Таким образом, с учётом отсутствия прибыли за первый год срок окупаемости составит 5,5 года. И уже на шестом году экономия нефтепродуктов даст положительные показатели.

Применение газоуравнительной системы

Сокращение потерь при использовании метода газовой обвязки оптимально при хранении одного типа нефтепродукта в различных резервуарах. Конструкционной особенностью данного метода является соединение трубопроводом газового пространства резервуаров с последующей конденсацией паров в отдельном резервуаре [3].

Несравненным плюсом данного метода является замкнутость системы резервуаров относительно окружающей среды. Однако этот метод требует использования только одного типа нефтепродуктов в данных резервуарах, а также больших капитальных вложений в строительство данной системы. Способ конденсации паров заключается в том, что пары, образующиеся во время «дыхания» топлива, конденсируются.

Преимущества: уровень снижения потерь нефтепродукта от испарений достигает 90 %, наблюдаются замкнутость системы относительно окружающей среды и сокращение выбросов парогазовой смеси в атмосферу.

Недостатки: большие капиталовложения из-за металлоёмкости конструкции и переоборудования измерительных приборов резервуаров; объединение нескольких резервуаров только одного типа хранения н/п; ГУС служат путём быстрого распространения огня сразу на несколько резервуаров.

Предлагаемая газоуравнительная система заключается в применении мягких резервуаров-газгольдеров.

Полимерный эластичный газгольдер-компенсатор изображён на рис. 3. Он предназначен для рекуперации паров лёгких фракций углеводородов малых и больших «дыханий» резервуарных парков при температуре окружающего воздуха от -45 до $+50$ °С. Эластичный газгольдер-компенсатор монтируется на территории нефтебаз нефтеперерабатывающих заводов, где хранятся и распределяются светлые нефтепродукты. Изготовлены такие газгольдеры из газо- и жидкостепроницаемого антистатического материала и размещаются на любом пригодном для этих целей участке резервуарного парка.

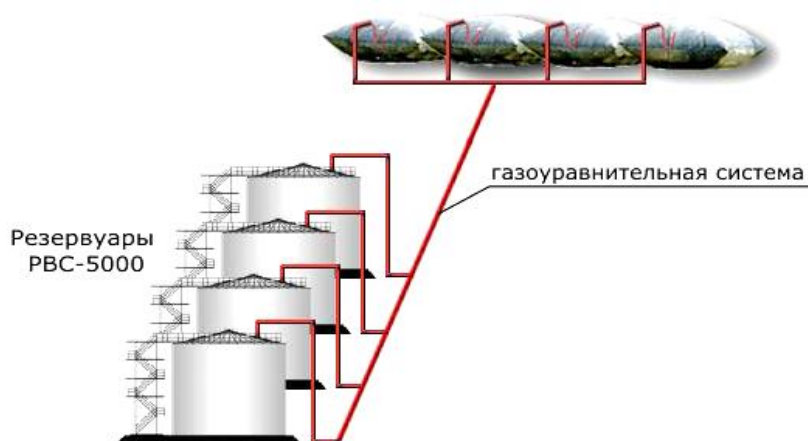


Рис. 3. Газоуравнительная система без дополнительного оборудования

В газгольдер-компенсатор поступает расширившаяся парогазовая смесь из внутренней полости резервуаров хранения при повышении температуры в последних за счёт естественного нагрева (малые «дыхания») в течение дневного времени суток, а также при больших «дыханиях» в процессе заполнения топливом резервуаров. Пары возвращаются обратно в резервуары при снижении температуры их газового пространства в вечернее и ночное время или при отпуске продукта потребителям. Данная система является замкнутой – «резервуар – газгольдер», что исключает расход свежего воздуха на «вдохе» резервуара и, как следствие, не требуется последующая конденсация новых объёмов лёгкой фракции углеводородов из его «выдоха».

Экономический эффект при внедрении технологии

К примеру, в резервуарный парк ежедневно поступает и отгружается 350 т бензина АИ-95; в использовании 4 резервуара объёмом 5000 м³ каждый. Рассчитаем потери за 2 квартала (май – октябрь) по формуле [4].

$$\Pi_{\text{рез}} = V_{\text{кв}} \cdot \frac{P_{\text{нас}}}{P_{\text{атм}}} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot 10^{-6}, \text{ т,}$$

где $V_{(2\text{кв})}$ – количество бензина, поступающего в группу резервуаров за два квартала, $V_{(2\text{кв})} = 86\,914 \text{ м}^3$; $P_{\text{нас}}$ – давление насыщенных паров бензина в резервуаре, $P_{\text{нас}} = 515 \text{ мм рт. ст.}$; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, $P_{\text{атм}} = 758 \text{ мм рт. ст.}$; K_1 – опытный коэффициент, характеризующий удельные потери углеводородов с учётом среднеквартальной оборачиваемости резервуаров, $K_1 = 0,1$; K_2 – коэффициент, учитывающий наличие технических средств сокращения потерь от испарения, и режим эксплуатации резервуара, $K_2 = 1,1$; K_3 – коэффициент, учитывающий влияние климатических условий на испарение, $K_3 = 1,625$.

1. Рассчитаем среднюю температуру за май – октябрь:

$$T_{\text{ср}} = \frac{5,4 + 8,9 + 18 + 22 + 12 + 5,5}{6} = 12 \text{ }^\circ\text{C.}$$

2. Найдём молекулярную массу для паров бензиновой фракции, г/моль:

$$M = 60 + 0,3 \cdot (t_{\text{нк}} - 30) + 0,001 \cdot (t_{\text{нк}} - 30)^2$$

$$M = 60 + 0,3 \cdot (35 - 30) + 0,001 \cdot (35 - 30)^2 = 61,5.$$

3. Рассчитаем плотность паров бензина при нормальных условиях:

$$\rho_0 = \frac{M}{22,4} \text{ кг / м}^3,$$

$$\rho_0 = \frac{61,5}{22,4} = 2,74.$$

4. Рассчитаем значение среднеквартальной температуры газового пространства резервуара по формуле $t_{cp} = 0,7 \cdot t_n + 0,3 \cdot t_b$, где t_n – температура бензина в резервуаре, $t_n = 14$ °С; t_{cp} – средняя температура воздуха за два квартала, $t_{cp} = 12$ °С: $t_{cp} = 0,7 \cdot 14 + 0,3 \cdot 12 = 13,4$ °С.

5. Находим плотность паров бензина при среднеквартальной температуре газового пространства, кг/м³: $\rho_{cp} = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{P_{атм}}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_0 + t_{cp}}$, где M – молекулярная масса паров бензиновой фракции, $M = 61,5$ г/моль; $P_{атм} = 758$ мм рт. ст.; $T_0 = 273$ К; $P_0 = 760$ мм рт. ст.; $t_{cp} = 13,4$ °С.

$$\rho_{cp} = \frac{61,5}{22,4} \cdot \frac{758}{760} \cdot \frac{273}{273 + 13,4} = 2,64 \text{ кг / м}^3.$$

6. Рассчитаем потери бензина за 2 квартала:

$$\Pi_{резервуара \text{ за } 6 \text{ мес.}} = 86914 \text{ м}^3 \cdot 0,68 \cdot 2,64 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,1 \cdot 1,1 \cdot 1,625 = 27890 \text{ кг} = 27,89 \text{ т.}$$

Стоимость одной тонны бензина АИ-95 равна 37 000 р. В итоге объём потерь составляет: $37\,000 \cdot 27,89 = 1\,031\,930$ р. за полгода.

Максимальная вместимость одного резервуара-газгольдера для одного резервуара РВС 5000 составляет 500 м³, эффективность системы – 90 %. Для того, чтобы оснастить парк из четырёх резервуаров РВС 5000, необходимо наличие четырёх резервуаров-газгольдеров.

Тоннаж уловленной системой из резервуаров-газгольдеров бензина составит 25 101 кг, или 928 737 р. Стоимость оборудования с учётом монтажных работ составит 1 550 000 р. В итоге срок окупаемости системы составит 1 год и 7 месяцев.

Использование полимерных резервуаров-газгольдеров в резервуарных парках даёт следующие положительные результаты:

1) исключение потерь бензина на 90 % при больших и частично при малых «дыханиях» резервуара;

2) отсутствие загрязнённости парами бензина рабочих мест обслуживающего персонала и улучшение экологической обстановки предприятия;

3) значительное уменьшение взрывопожароопасности объектов хранения нефти и нефтепродуктов;

4) сохранение качества нефти и нефтепродуктов;

5) сведение к минимуму объёма эксплуатационных расходов;

6) повышение взрыво- и пожаробезопасности на предприятии;

7) эксплуатация газоуравнительной системы с мягкими резервуарами-газгольдерами в режиме малых «дыханий», не требующей затрат какой-либо энергии и постоянного надзора персонала;

8) прямой возврат оживленного из паровоздушной смеси продукта в технологический процесс (без процессов сорбции-десорбции и других дополнительных стадий);

9) простота конструкции, надёжность, неприхотливость и долговечность оборудования;

10) отсутствие необходимости в частых ревизиях и ремонте оборудования, содержании высококвалифицированного обслуживающего персонала.

Недостатком данной технологии является значительная занимаемая площадь.



Опыт применения технологии

В 2007 году системы рекуперации на базе эластичных газгольдеров-рекуператоров нового поколения установлены на двух нефтебазах в Крыму. Эксплуатирующей организацией «Корпорация ТЭС» отмечены исключительная производительность данной замкнутой системы рекуперации ЛФУ и сокращение потерь от «дыханий» до 90 % при практически нулевых эксплуатационных расходах.

Заключение

По итогам проделанной работы была выявлена возможность применения дисков-отражателей и резервуаров-газгольдеров для сокращения потерь лёгких нефтепродуктов из резервуаров.

Данное оборудование позволит:

- 1) уменьшить потери углеводородов из резервуаров и получить дополнительную прибыль за счёт сокращения потерь нефтепродукта;
- 2) сократить потери бензина при больших и малых «дыханиях»;
- 3) обеспечить отсутствие загрязнённости парами бензина рабочих мест обслуживающего персонала;
- 4) снизить вредные выбросы в атмосферу и улучшить экологическую обстановку объекта до требуемых нормативов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абузова, Ф. Ф. Пути сокращения потерь углеводородов от испарения при хранении и транспортировании нефти и нефтепродуктов / Ф. Ф. Абузова, Г. Д. Теляшева, Ю. Ф. Мишин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1989. – Вып. 5. – 56 с.
2. Дегтярев, В. Н. Пути повышения надёжности работы резервуаров с понтонами / В. Н. Дегтярев, С. М. Богачев // Нефтепромысловое дело. – 1984. – № 8. – С. 114-118.
3. Майорова, Н. Газоуравнительные системы. Применение / Н. Майорова, Г. Скоков. – М.: Белый город, 2009. – 127 с.
4. Матлашов, И. А. Расчёт потерь нефти и нефтепродуктов из резервуаров нефтеперерабатывающих предприятий. Методика расчёта / И. А. Матлашов. – Москва, 2000. – 54 с.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
METALLURGY AND MATERIALS

Ким В. А., Белова И. В.
V. A. Kim, I. V. Belova

**СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МЕЖЗЁРЕННЫХ ГРАНИЦ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ
ЛАЗЕРНОМ ЛЕГИРОВАНИИ**

**STRUCTURAL ORGANIZATION OF INTERGENERAL BORDERS with LOCAL LASER
DOPING**

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sinerg@mail.ru.

Vladimir A. Kim – doctor of technical sciences, professor of the Department of materials science and technology of new materials Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sinerg@mail.ru.

Белова Инна Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: inna_belova@mail.ru.

Inna V. Belova – PhD in Engineering, associate professor of the Department of materials science and technology of new materials Komsomolsk-on-Amur State University. E-mail: inna_belova@mail.ru.

Аннотация. Образование поверхностных структур при лазерном легировании представляет собой комплексный процесс, включающий термические структурные превращения, конвективный и диффузионный перенос вещества, а также химические реакции, инициированные высококонцентрированным световым воздействием. Конвективное перемешивание элементов покрытия с основой реализуется только в самых верхних слоях обрабатываемой поверхности, расплавленной и нагретой до температур кипения. Основным механизмом массопереноса при лазерном легировании считается диффузия, вызванная высокой температурой и градиентами концентраций химических элементов, дефектами кристаллического строения. Высокая активность массопереноса при лазерном легировании объясняется также тем, что в процессе термических превращений в обрабатываемом материале образуются структуры, представляющие каналы повышенной диффузионной проводимости. К ним относят границы зёрен, скопления дислокации, зоны с повышенной концентрацией вакансий, аморфные фазы и др.

Summary. The formation of surface structures in laser doping is a complex process involving thermal structural transformations, convective and diffusive transport of matter, as well as chemical reactions initiated by highly concentrated light. Convective mixing of the covering elements with the substrate is realized only in the uppermost layers of the treated surface, molten and heated to boiling points. The main mechanism of mass transfer in laser doping is diffusion due to high temperature and gradient concentrations of chemical elements, defects in the crystal structure. The high activity of mass transfer during laser doping is also explained by the fact that in the process of thermal transformations, structures that represent channels of enhanced diffusion conductivity are formed in the material being processed. These include grain boundaries, dislocation clusters, zones with an increased concentration of vacancies, amorphous phases, etc.

Ключевые слова: структурная организация, лазерное легирование, межзёренные границы, лазерная термическая обработка, микроструктура, упрочнение сталей, фрактальная размерность.

Key words: structural organization, laser alloying, intergranular boundaries, laser thermal treatment, microstructure, hardening of steels, fractal dimension.

УДК 621.375.826

Введение

В зависимости от энергии лазерного воздействия и теплофизических свойств обрабатываемого материала, образующаяся поверхностная структура имеет неоднородное слоистое строение. Каждый слой отличается своей структурной организацией межзёренных границ, которые представляют наиболее активные каналы диффузионного массопереноса. В металлах диффузия по границам зёрен на 4,0...6,0 порядков выше, чем диффузия по решётке [5; 6]. Внутренние поверхности или границы зёрен и раздела фаз играют важную роль в упрочнении сталей и металлических сплавов, блокируя подвижность скользящих дислокаций, генерируемых локальной пластической деформацией.

На изображениях микроструктур внутренние поверхности отображаются в виде линейных объектов, а их структурную организацию количественно оценивают плотностью границ и их фрактальной размерностью. Вычисление указанных количественных показателей осуществляется методом компьютерной металлографии обработки изображений микроструктур [4; 7].

Согласно современным представлениям, химические элементы с более низкой диффузионной активностью могут проходить больший диффузионный пробег по граничным каналам, так как активные элементы сразу же поглощаются «стенками» границ и растворяются в объёме смежных зёрен [5]. Высокая концентрация легирующих элементов в структуре границ зёрен повышает их устойчивость и способность торможения скользящих дислокаций при пластической деформации, повышая эффект упрочнения. В статье приведены результаты исследований структурной организации межзёренных границ, сформированных при лазерной обработке, и показана их роль в процессах упрочнения.

Методика исследований

Исследования проводились на образцах из нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T. Выбор этого материала обосновывался тем, что данная сталь не подвергается упрочнению термической обработкой, в том числе и лазерным воздействием. Упрочнение, вызванное лазерным легированием, связывается исключительно с массопереносом химических элементов из покрытия в основу, при этом ширину диффузионной зоны можно определить по изображениям микроструктур, полученных оптической микроскопией, и характеру распределения микротвёрдости по глубине поверхностного слоя.

На исследуемые образцы предварительно наносились шликерные покрытия из порошков графита и стандартного твёрдого сплава ВК8, состоящего из 82,0 % карбида вольфрама и 8,0 % кобальта, а в качестве связующего использовался 5,0%-ный раствор канифоли в этиловом спирте. После высыхания и часовой выдержки образцов в сушильной камере при температуре 100 °С толщина покрытий составляла 0,10...0,12 мм. Лазерная обработка образцов осуществлялась на технологической установке LRS-300 с длиной волны инфракрасного излучения $\lambda = 1,04$ мкм. Обработанная поверхность представляла дорожку, состоящую из пятен лазерного воздействия круглой формы диаметром $d = 2,0$ мм, наложенных друг на друга с коэффициентом перекрытия $k_{\text{п}} = 0,75$.

Энергетические режимы лазерного излучения обеспечивались сочетанием напряжения накачки квантрона (U), длительности импульса (t) и диаметра пятна лазерного воздействия (d). Энергия излучения (W) измерялась датчиком, встроенным в конструкцию установки, а её значение выводилось на монитор технологического лазера. Плотность мощности лазерного излучения (B) и удельную энергию (E) определяли расчётным путём.

Режимы лазерной обработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы лазерной обработки

$U, В$	$t, мс$	$W, Дж$	$d, см$	$E, Дж/см^2$	$B \cdot 10^5, Вт/см^2$
450	0,5	2,4	0,19	89,69	1,69
	1,0	6,4		225,84	2,26
	2,0	15,0		529,32	2,65
	3,0	23,0		811,62	2,71

Выбранные режимы излучения обеспечивали оплавление поверхностного слоя с образованием небольшой лунки, на поверхности которой присутствовали остатки легирующего покрытия в виде отдельных островковых пятен.

Травление металлографических шлифов проводилось раствором глицерина, соляной и азотной кислот в соотношении 4:4:3. Цифровое изображение микроструктуры фиксировалось с помощью металлографического микроскопа Nikon MA-200 при 1000-кратном увеличении.

Обработка изображений осуществлялась программой Image.Pro.Plus.5.1, включающей коррекцию резкости и контрастности, калибровку в соответствии с кратностью увеличения и снятие контрастной маски. Структурная организация подповерхностного слоя количественно оценивалась следующими показателями: площадь (F_i), периметр (P_i) и фрактальная размерность границ (D) каждого микроструктурного объекта, а также их количество (N), зафиксированные на определённом участке металлографического шлифа площадью F_ϕ .

Исходя из предположения, что упрочнение материала связано с торможением подвижных дислокаций при пластической деформации, а наиболее активно блокирование дислокаций производится границами зёрен и раздела фаз, в качестве комплексного показателя структурной организации была принята удельная длина границ, рассчитываемая по формуле [4; 8]

$$q_{уд} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{F_\phi},$$

где $q_{уд}$ – удельная длина, 1/мкм; P_i – периметр, мкм; F_ϕ – площадь металлографического шлифа, мкм².

Степень развитости границ как «транспортного коридора» для диффузионного массопереноса оценивается совокупностью двух показателей: удельной длины $q_{уд}$ и фрактальной размерности D .

Микротвёрдость определялась с помощью микротвердомера HNV-2 (Shimadzu Corporation) при нагрузке 0,49 Н. На основании многократных повторений вычислялись средние значения микротвёрдости и среднеквадратичное отклонение.

Полученные результаты и их анализ

Шликерное покрытие является источником легирующих элементов и одновременно обладает высоким коэффициентом светопоглощения. Поэтому температурное поле и структурные превращения в поверхностных слоях, инициированные тепловым импульсом, при одной и той же удельной энергии лазерного излучения будут отличаться в зависимости от состава и структуры легирующего покрытия. Большинство технологий лазерного модифицирования поверхностей предусматривает оплавление самых верхних слоёв. Наличие жидкофазного слоя влияет на все процессы структурообразования, в том числе на структурные превращения, протекающие в твёрдофазной зоне термического влияния. Особенно активна эта роль в процессах лазерного легирования, так как жидкофазное состояние обладает более высокой диффузионной проводимостью и является источником тепла, функционирующим более длительный период после прекращения действия лазерного импульса.

Характер кристаллизации расплавленных слоёв зависит от динамики тепловых потоков и механизмов массопереноса, возникающих в обрабатываемом материале в период действия лазерного импульса и после его прекращения. Необходимо различать жидкофазные системы, в которых функционируют конвективные, ламинарные и диффузионные массовые потоки. Механизм массовых потоков определяет скорость распространения легирующих элементов из покрытия в основу, объёмный характер распределения центров кристаллизации и направление роста кристаллов. Динамический температурный фон ответственен за скорость образования центров кристаллизации и скорость роста кристаллов, а также доминирующее влияние того или другого фактора на структурообразование.

На рис. 1 представлены микроструктуры обрабатываемого материала в исходном состоянии, после лазерной термической обработки и локального лазерного легирования. Поверхностная

структура, сформированная под действием лазерного термического воздействия, имеет слоистое строение, при этом каждый слой характеризуется своими индивидуальными условиями нагрева, охлаждения и кристаллизации. В результате в нём образуется определённая структура, характеризующаяся различной активностью межзёренных границ с точки зрения диффузионного массопереноса.

В микролокальных зонах, в которых в расплавленном состоянии наблюдались турбулентные и ламинарные массовые потоки, кристаллизация протекает при высоких температурах перегрева. В этом случае в процессах структурообразования фактор скорости образования центров кристаллизации превалирует над фактором скорости роста кристаллов. В результате формируется субмелкодисперсная структура с зёрнами равноосной и глобулярной форм, образующими колонии с разной степенью упорядоченности [2]. Такие микроструктуры наблюдаются как при чисто лазерной обработке, так и лазерном легировании.

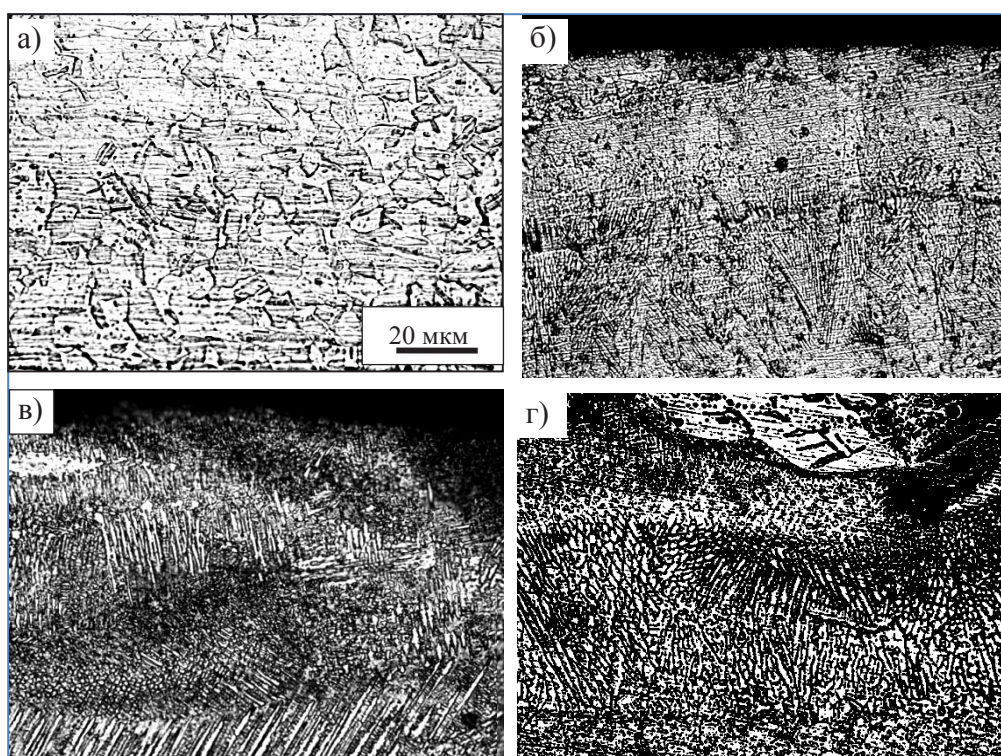


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя:

а – в исходном состоянии; б – после лазерной обработки; в – после лазерной цементации; г – после лазерного легирования VK8

По мере охлаждения микрованны расплава и роста кристаллов меняется режим кристаллизации и массопереноса в остаточной жидкой фазе, которая в определённый период остаётся активной средой для диффузионных процессов. Границы зёрен кристаллизуются в последнюю очередь и сохраняют повышенную диффузионную проводимость до полного охлаждения материала. Высокая плотность дефектов кристаллического строения границ дополнительно повышает их диффузионную активность. Микролокальные зоны, где реализуются вышеописанные процессы, на изображении микроструктур имеют более тёмный фон, указывая на высокую величину химического потенциала структурного состояния, которая подвергается более активному травлению при подготовке металлографического шлифа. Такие зоны хорошо видны на микроструктурах, представленных на рис. 1, б, в, г.

В слоях, охваченных жидкофазной диффузией, кристаллизация расплавленного слоя и массоперенос элементов из легирующего покрытия вглубь протекает по-разному в зависимости

от температуры перегрева и уровня самой температуры. В этом случае в процессах структурообразования фактор скорости роста кристаллов доминирует над фактором скорости образования центров кристаллизации, в результате образуются столбчатые кристаллиты или дендриты первого, второго и более высоких порядков. Ориентация дендритов первого порядка и ствольных дендритов высоких порядков зависит от температуры расплава и его градиента.

Температура определяет кинетическую энергию атомов, их подвижность и степень ближнего порядка. При относительно низкой температуре ближний порядок атомов твердофазной системы сохраняется при её переходе в жидкофазное состояние, поэтому ориентация дендритов будет наследственно связана с положением атомов исходной структуры. Возникающие дендриты образуют упорядоченные группы в пределах исходных зёрен с сохранением геометрии межзёренных границ твердофазной системы. При высокой температуре кинетическая энергия атомов разрушает ближний порядок исходного твердофазного состояния, и на ориентацию дендритов главное влияние будут оказывать направления градиентов температур или тепловых потоков. При высоких градиентах температур в зоне повышенных температур перегрева образуются дендриты первого порядка, а в зонах низких температур на ствольных фрагментах дендритов появляются отростки дендритов второго порядка.

Жидкофазная диффузия легирующих элементов из покрытия в подложку влияет на характер кристаллизации остаточного расплава. Тугоплавкие металлы и их соединения могут дополнительно создавать центры кристаллизации. Химические элементы, повышающие жидкотекучесть, могут создавать благоприятные условия для диффузии менее активных диффузентов. Углерод при наличии в обрабатываемом материале карбидообразующих металлов приводит к образованию повышенной плотности концентраторов напряжений вдоль границ зёрен. По мере кристаллизации расплава жидкофазные каналы теряют диффузионную проводимость и меняется их химический состав. Всё это приводит к химической ликвации растущих кристаллитов и неоднородному распределению внутри зёрен дефектов кристаллического строения.

Учитывая, что границы зёрен являются наиболее активными каналами диффузионной проводимости, их способность «транспортировки» легирующих элементов можно оценить по удельной длине границ и их фрактальной размерности. Чем больше удельная длина границ, тем выше потенциальная плотность массового потока легирующих элементов из покрытия вглубь. Чем выше фрактальная размерность границ, тем больше препятствий на диффузионном пути. Фрактальные свойства границ формируются при кристаллизации и в период остывания материала в твердофазном состоянии. Основными механизмами структурообразования, влияющими на фрактальную размерность, являются образование концентраторов напряжений нано- и микромасштабного уровня и миграция границ.

В табл. 2 приведены средние значения удельных границ исследуемого материала в исходном состоянии, после лазерной термической обработки и лазерного легирования.

Таблица 2

Количественные показатели микроструктуры нержавеющей стали 12Х18Н10Т до и после лазерной обработки

Состояние структуры	В исходном состоянии	Лазерная обработка	Лазерная цементация	Легирование ВК8
Удельная длина границ, $q_{уд}$, 1/мкм	1,6188	3,6068	2,7681	1,8655
Фрактальная размерность, D	1,1601	1,2246	1,1685	1,1723

На рис. 2 и 3 показаны распределения микроструктурных объектов по длине периметров границ и их фрактальной размерности. При этом площадь поверхности шлифа, зафиксированная на изображении, составляет $F_{\phi} = 3088 \text{ мкм}^2$.

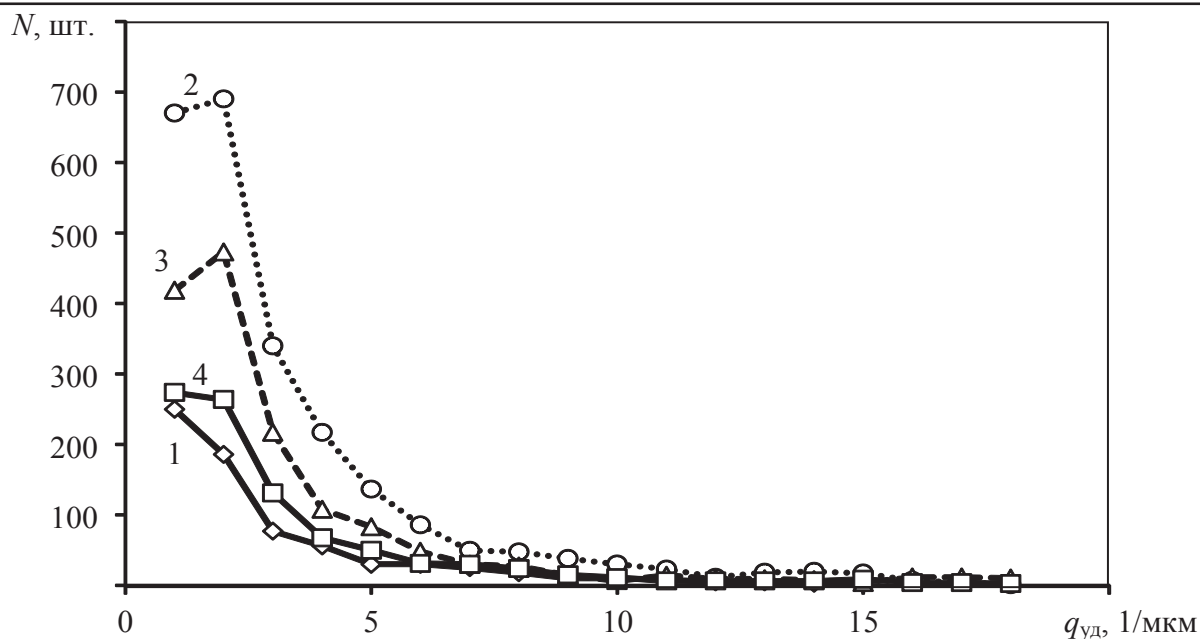


Рис. 2. Распределение микроструктурных объектов по длине периметра границ:
 1 – исходная структура; 2 – после лазерной обработки; 3 – лазерная цементация;
 4 – лазерное легирование покрытием из ВК8

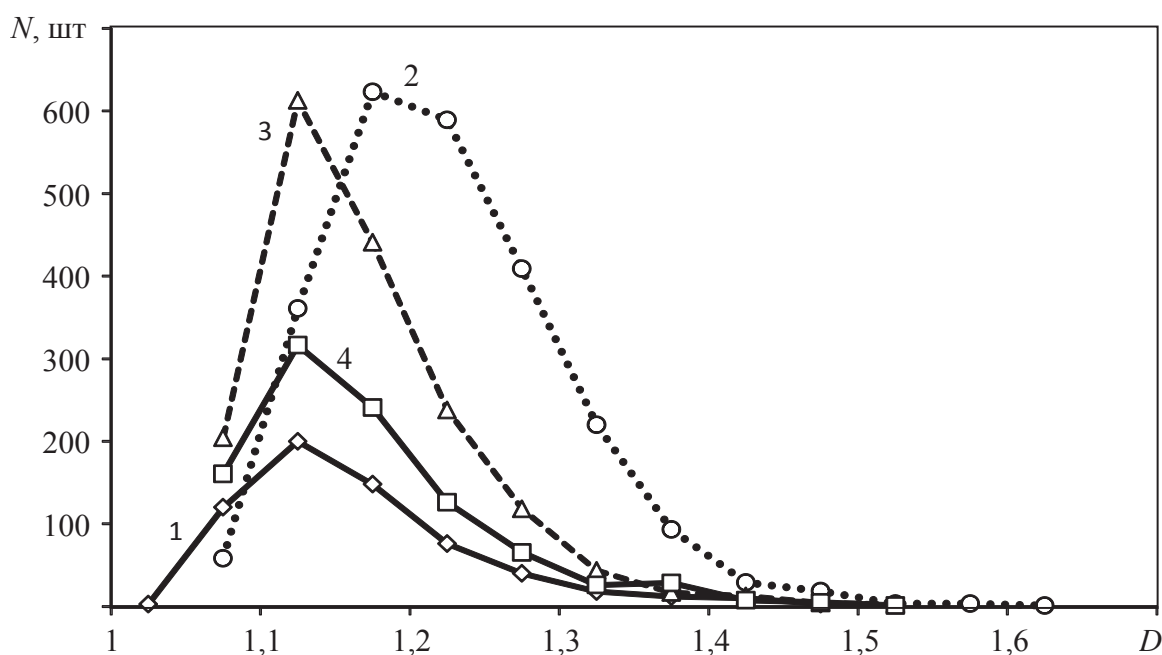


Рис. 3. Распределение микроструктурных объектов по фрактальной размерности границ:
 1 – исходная структура; 2 – после лазерной обработки; 3 – лазерная цементация;
 4 – лазерное легирование покрытием из ВК8

Анализ представленных результатов показывает, что чисто лазерная обработка нержавеющей стали 12Х18Н10Т увеличивает удельную длину границ и их фрактальную размерность, которые принимают максимальные значения из всех рассмотренных вариантов обработок. Тем не ме-

нее, в отличие от других углеродистых и легированных сталей, это не приводит к серьёзному упрочнению материала. Слабая идентификация границ при длительном травлении металлографического шлифа нержавеющей стали в реактиве указывает на однородность распределения свободной энергии в структуре материала и относительно низкой плотности различных концентраторов внутренней энергии [1; 3]. Поэтому даже при высокой развитости внутренних поверхностей они обладают низкой величиной градиента химического потенциала и в меньшей степени проявляют способность к торможению скользящих дислокаций, генерируемых пластической деформацией.

В результате лазерного легирования удельная длина границ и их фрактальная размерность принимают меньшие значения по сравнению со структурой, полученной чисто лазерной обработкой, но большие, чем у исходной. На основании полученных зависимостей можно предположить, что термические процессы формируют основные каналы диффузионной проводимости, по которым осуществляется перенос легирующих элементов из покрытия в подложку. Диффундирующие элементы становятся активным фактором структурообразования, которые в зависимости от физико-химических свойств влияют на процессы кристаллизации оставшейся жидкой фазы и развитие дефектов кристаллического строения. Углерод, являясь более активным в диффузионном отношении элементом, глубже проникает по межзёрненным жидкофазным каналам, снижает температуру ликвидуса и повышает скорость роста кристаллов. Это приводит к укрупнению зёрен и снижению удельной длины границ. Диффузия углерода по твердофазным каналам после кристаллизации тормозит развитие и миграцию границ в период остывания. В результате удельная длина границ принимает высокие значения, но не дотягивает до уровня развитости, который обеспечивается чисто лазерной обработкой, а фрактальная размерность принимает значения, как у исходной структуры.

При использовании в качестве легирующего покрытия порошка из ВК8 для диффузии вольфрама необходимо разложение карбида вольфрама до атомарного состояния. Диффузия вольфрама и графита протекает с разной активностью, связанной с разной энергией активации. Скорость распространения углерода будет выше по сравнению с вольфрамом. Кроме того, активная диффузия вольфрама возможна только при относительно высоких температурах. По мере проникновения вольфрама вглубь образуются карбиды, присутствие которых вместе с вольфрамом в остаточной жидкой фазе способствует росту количества центров кристаллизации, которые концентрируются по границам растущих зёрен, и это приводит к повышению их развитости. В результате фрактальная размерность границ принимает большие значения, чем при лазерной цементации.

На рис. 4, 5 и 6 показано распределение микротвёрдости по глубине поверхностного слоя после лазерной обработки различных вариантов. Цифры на графиках соответствуют режимам лазерной обработки, приведённым в табл. 1.

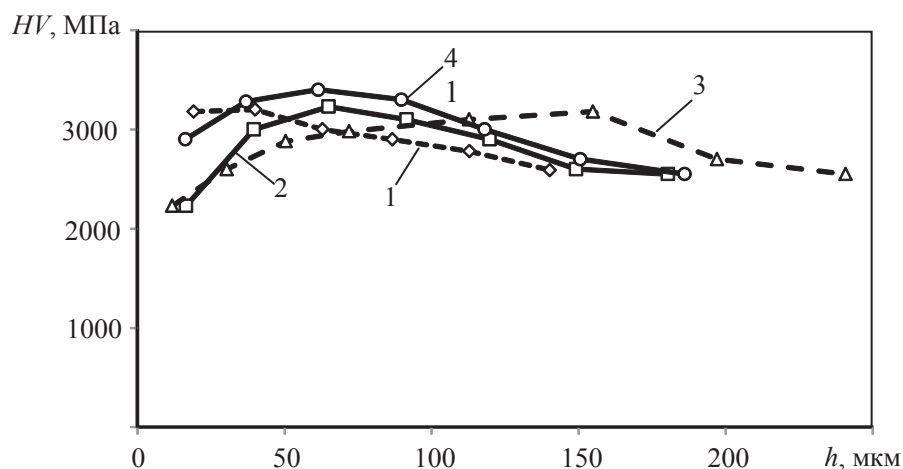


Рис. 4. Распределение микротвёрдости по глубине обработанной лазерным излучением поверхности

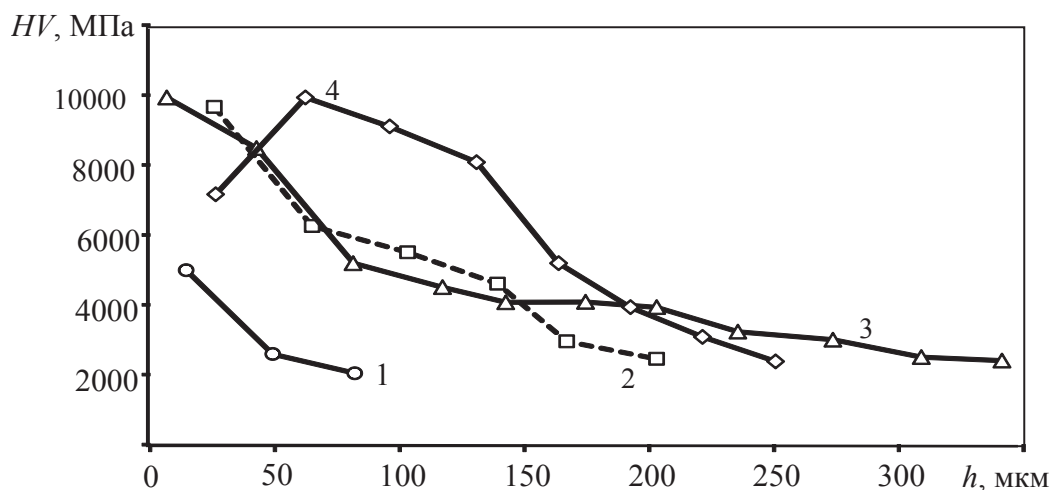


Рис. 5. Распределение микротвёрдости по глубине поверхности после лазерной цементации

Лазерная цементация и легирование порошковым покрытием из ВК8 обеспечили повышение микротвёрдости в несколько раз. Максимальная микротвёрдость при лазерной цементации составила $HV = 10000$ МПа, а при легировании ВК8 – $HV = 18000$ МПа.

С повышением удельной энергии лазерного излучения ширина диффузионной зоны возрастает и микротвёрдость верхних слоёв меняется по экстремальной зависимости. Поверхностная микроструктура, сформированная при лазерной цементации, характеризуется меньшим градиентом микротвёрдости, чем при легирующем покрытии из ВК8; это подтверждает то, что энергия активации диффузии вольфрама превышает энергию активации графита.

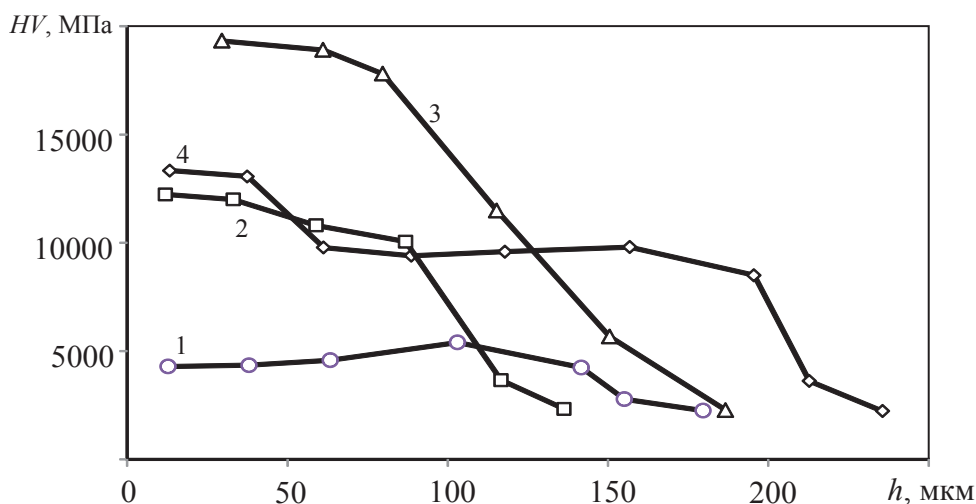


Рис. 6. Распределение микротвёрдости по глубине поверхности после лазерного легирования с использованием покрытия из ВК8

Выводы

Из полученных данных следует:

1. Лазерное легирование нержавеющей стали аустенитного класса является эффективным способом поверхностного упрочнения.

2. Межзёренные границы представляют каналы повышенной диффузионной проводимости, активность которых проявляется на всех стадиях структурообразования при лазерном легировании.

3. Диффузионную активность межзёренных границ можно количественно оценить теми же показателями, которые используются для описания их развитости, в частности, удельной длиной границ и фрактальной размерностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
2. Григорьянц, А. Г. Лазерная техника и технология. Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. И. Сафонов. – М.: Высш. шк., 1987. – 191 с.
3. Ким, В. А. Исследование структурных превращений при пластической деформации стали 20 / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – № 1(82). – С. 32-36.
4. Ким, В. А. Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов / В. А. Ким, И. В. Белова, С. В. Золотарева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – № 4(80). – С. 43-46.
5. Кристин, Дж. Термодинамика и общая кинетическая теория. Теория превращений в металлах и сплавах / Дж. Кристин; пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 810 с.
6. Мерер, Х. Диффузия в твёрдых телах / Х. Мерер; пер. с англ. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. – 536 с.
7. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. П. Бондарь [и др.]; отв. ред. В. Е. Панин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
8. Статистическая оценка количественной металлографии / В. А. Ким, Р. В. Евдокимова, С. В. Золотарева, А. А. Попкова, М. Йошида // Учёные записки КнАГТУ. Науки о природе и технике. – 2013. – № II-1(14). – С. 76-82.



Полянская И. Л., Белова Л. В., Устюгова Н. В., Стаселько О. Л.

I. L. Polyanskaya, L.V. Belova, N. V. Ustyugova, O. L. Staselko

ПРЕВРАЩЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА ПРИ НАГРЕВЕ СТАЛИ 95X18Ш

CHANGE OF RETAINED AUSTENITE ON HEATING STEEL 95X18Ш

Полянская Ирина Леонидовна – кандидат технических наук Уральского государственного университета путей сообщения (филиал в г. Тюмени) (Россия, Тюмень); 625008, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Калинина, 5. E-mail: polyanskaya_il@inbox.ru.

Ms. Irina L. Polyanskaya – PhD in Engineering of Ural State University of Railway Transport (Tyumen branch) (Russian, Tyumen); 625008, Tyumen region, Tyumen, 5 Kalinin str. E-mail: polyanskaya_il@inbox.ru.

Белова Лариса Владимировна – кандидат технических наук Тюменского индустриального университета (Россия, Тюмень). E-mail: klv.72@mail.ru.

Ms. Larisa V. Belova – PhD in Engineering of Tyumen Industrial University (Russia, Tyumen). E-mail: klv.72@mail.ru.

Устюгова Наталья Викторовна – старший преподаватель Тюменского индустриального университета (Россия, Тюмень). E-mail: unata72@mail.ru

Ms. Natalya V. Ustyugova – Senior Lecturer of Tyumen Industrial University (Russia, Tyumen). E-mail: unata72@mail.ru.

Стаселько Оксана Леонидовна – ассистент Тюменского индустриального университета (Россия, Тюмень). E-mail: staselkool@tyuiu.ru.

Ms. Oksana L. Staselko – Assistant Lecturer of Tyumen Industrial University (Russia, Tyumen). E-mail: staselkool@tyuiu.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты исследований изменений микроструктуры углеродистой стали 95X18Ш резервуаров при нагреве. При исследовании превращений остаточного аустенита мы столкнулись с явлениями, которые объяснить пока не в состоянии. Поэтому мы описали превращения, которые испытывает остаточный аустенит, не вскрывая механизма этих превращений. Анализ полученных результатов исследований показал процессы рекристаллизации, изменение твердости, фона внутреннего трения аустенитной стали. Установлено, что особенности распада аустенита при отпуске будут определяться значением температуры, до которого производился нагрев при отпуске стали.

Summary. The article presents the results of studies of changes in the microstructure of carbon steel 95x18Sh tanks on heating. In the study of residual austenite transformations, we are faced with phenomena that are not yet in a state to explain. Therefore, in our article, we have made a description of the transformations that retained austenite undergoes without revealing the mechanism of these transformations. Analysis of the treated results of research showed recrystallization processes, changes in hardness, background of internal friction of austenitic steel. It has been established that the peculiarities of austenite decomposition on tempering will be determined by the temperature to which the heating was performed on tempering steel.

Ключевые слова: микроструктура, мартенсит, аустенит, отпуск, фон внутреннего трения, температура закалки, температура отпуска, твердость, мартенситные иглы, рекристаллизация, фазовый наклёп, карбиды.

Key words: microstructure, martensite, austenite, tempering, internal friction background, quenching temperature, tempering temperature, hardness, martensitic needles, recrystallization, phase hardening, carbides.

УДК 669.111.35:539.4.015

Введение

Температура закалки сталей для производства узлов механизмов трения и качения приводит к значительным изменениям структуры стали. Растёт аустенитное зерно, увеличивается количество микродефектов кристаллического строения, происходит перераспределение элементов, входящих в состав стали. Все эти факторы оказывают существенное влияние на долговечность и износостойкость механизмов.

Методика проведения исследований

Микроструктуру сталей исследовали на оптическом микроскопе Nikon ECLIPS MA100/MA100L. Шлифы изготавливались обычным методом. Травление производилось в 4 %-м спиртовом растворе азотной кислоты и в 20 %-м растворе соляной кислоты в зависимости от химического состава сталей.

Твёрдость закалённых и отпущенных образцов измерялась на приборе ТК-14-250 алмазным конусом по шкале HRC с нагрузкой 150 кг. Твёрдость измерялась не менее, чем в 5–7 точках на каждом образце.

Результаты исследований

Улучшение контактной прочности подшипников связано с распадом остаточного аустенита и его стабилизацией при дополнительном нагреве. В процессе исследований изучался переход остаточного аустенита в мартенсит.

Качественный анализ микроструктуры образцов стали 95X18Ш (см. рис.1), закалённых при температуре 1200 °С в течение 4 часов, показал, что структура исследуемой стали включает остаточный аустенит, в котором видны двойники и карбидные частицы.

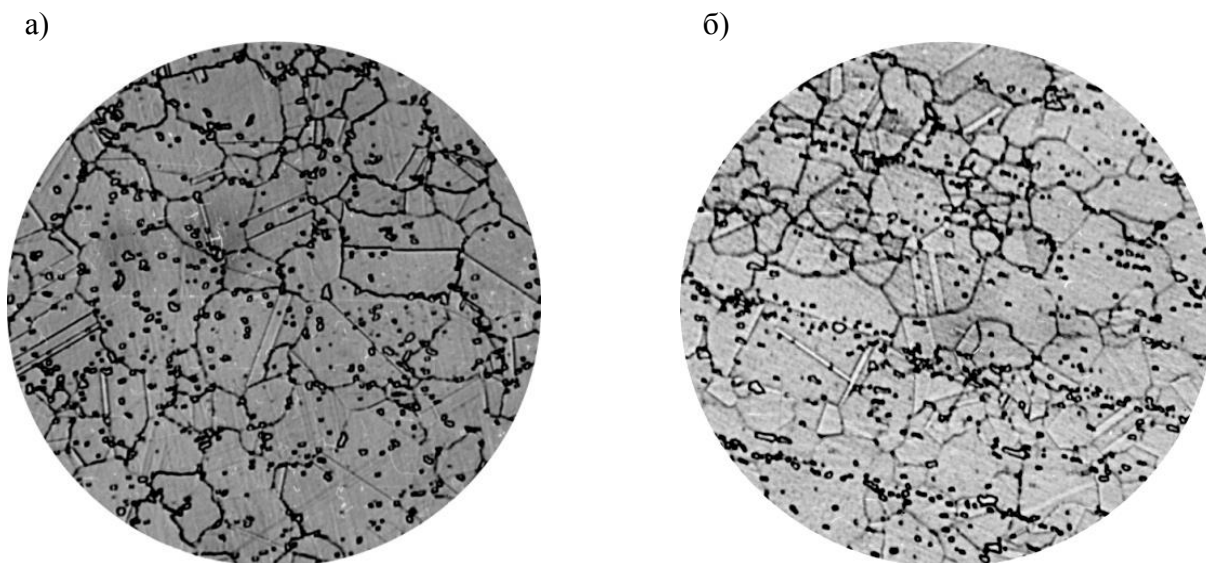
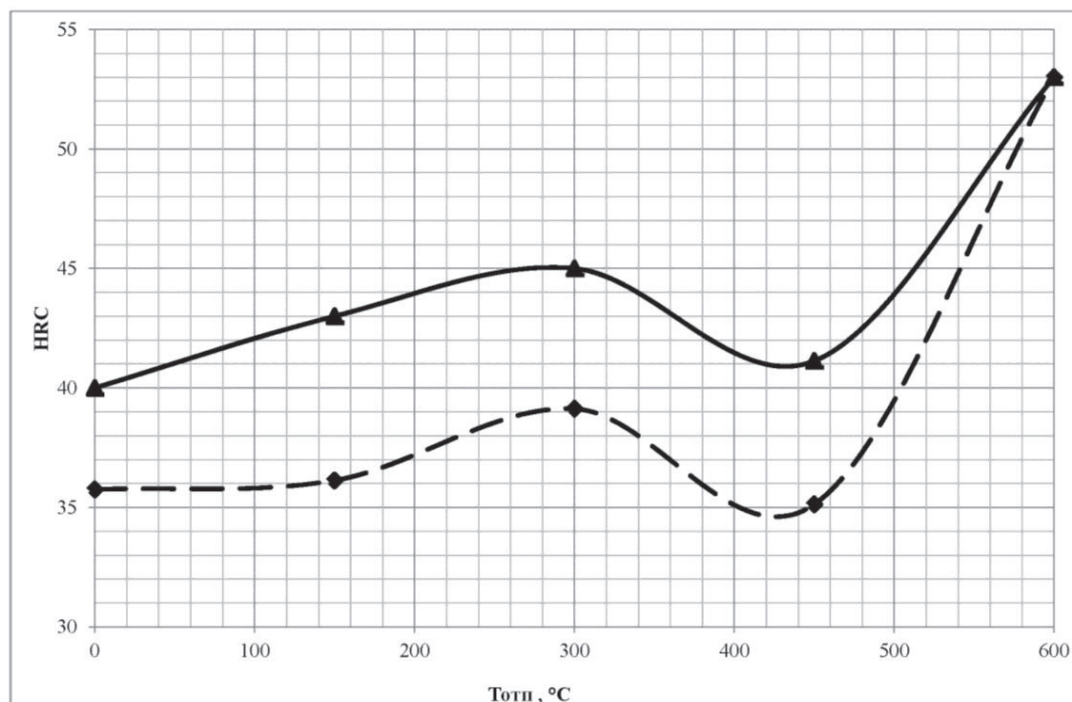


Рис. 1. Структура стали 95X18Ш, закалённой при значении температуры, равном 1200 °С, в течение 4 часов: а – поперёк проката; б – вдоль проката

После отпуска стали при температуре 300 °С в течение 3-4 часов в структуре появляется большое количество мартенсита. Судя по травимости (чёрный цвет), это мартенсит отпуска.

Выделение мартенсита наблюдается и у стали, закалённой по режиму 1200 °С в течение 30 минут, что менее продолжительно по времени в отличие от стали, закалённой по режиму 1200 °С в течение 4 часов. Выделение мартенсита приводит к повышению твёрдости стали (см. рис. 2) [3; 4].

а)



б)

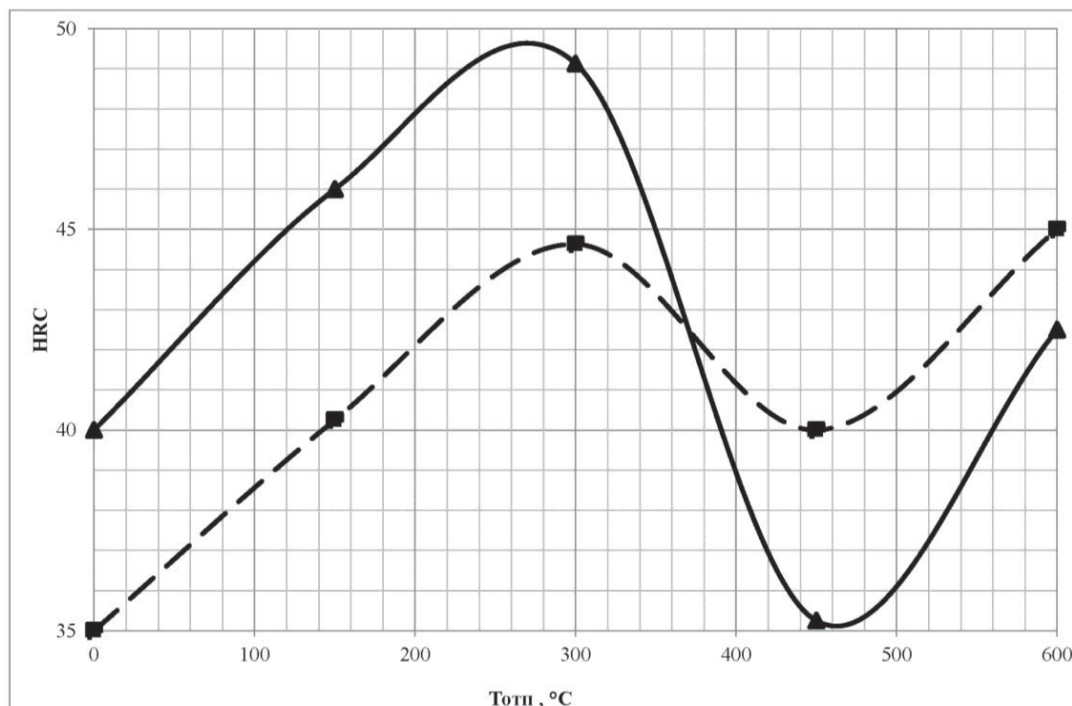


Рис. 2. Влияние температуры отпуска на твёрдость стали 95X18Ш, закалённой при различных значениях температур, равных:
а – 1200 °С (в течение 30 минут); б – 1200 °С (в течение 4 часов)

Это хорошо видно на фотографиях микроструктуры (см. рис. 3–5) и по характеру изменения твёрдости при отпуске при нагреве до температуры 300 °С.

Повышение температуры отпуска до 400 °С приводит к значительным изменениям в структуре стали. Мартенсит, который до этого был хорошо виден на рис. 3, а в виде чёрных иголок, ис-

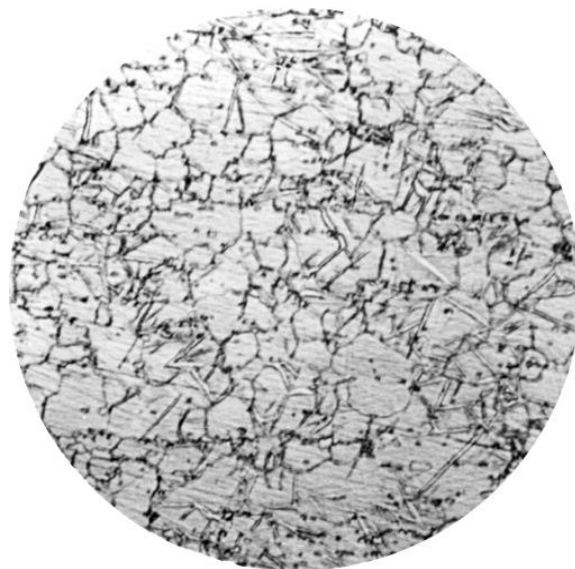
чезает. На месте бывших мартенситных игл на фотографиях видны слабые следы в виде светлых игл (см. рис. 3, б), при этом твёрдость стали уменьшается.

а)



Увеличено в 120 раз

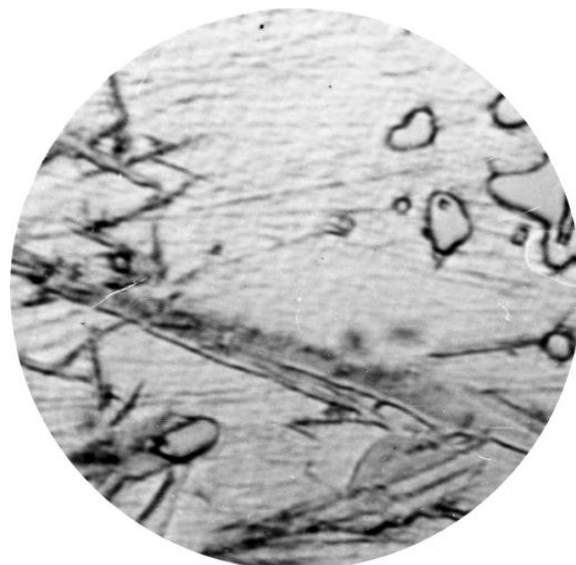
б)



Увеличено в 120 раз



Увеличено в 440 раз

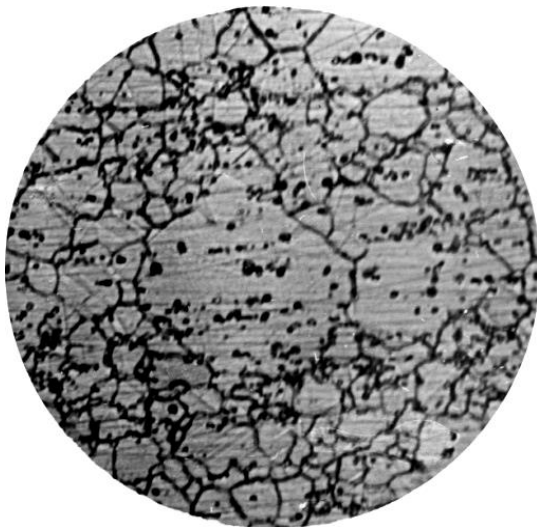


Увеличено в 440 раз

Рис.3. Влияние отпуска на структуру стали 95X18Ш, закалённой при значении температуры, равном 1200 °С (в течение 4 часов):
а – отпуск при 300 °С; б – отпуск при 400 °С

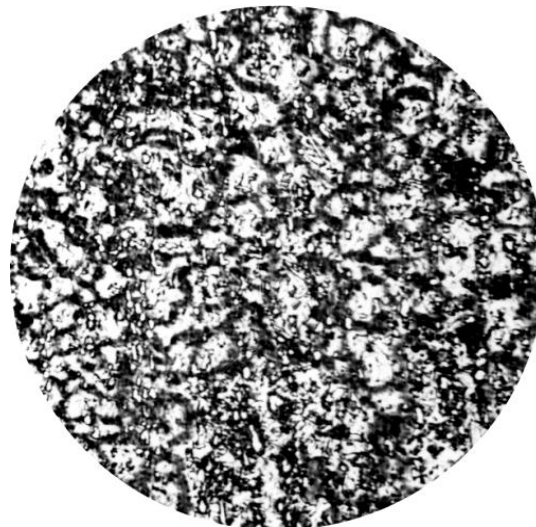
При дальнейшем повышении температуры отпуска в стали начинает развиваться процесс собирательной рекристаллизации, который приводит к росту отдельных зёрен (см. рис. 4, а и 5, б). Развитие процесса рекристаллизации обусловлено, по-видимому, фазовым наклёпом, возникшим в результате превращений [3; 8].

а)

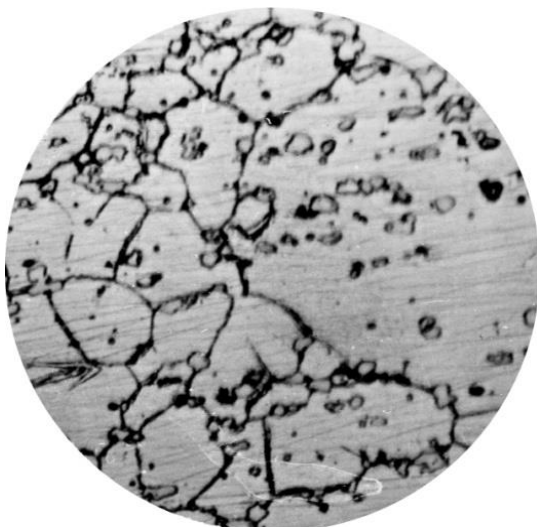


Увеличено в 120 раз

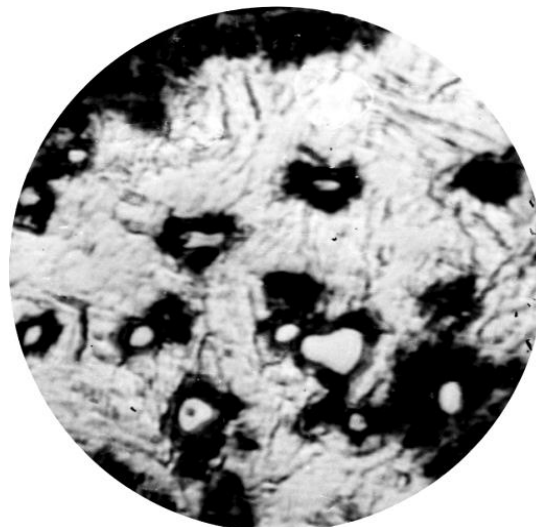
б)



Увеличено в 120 раз



Увеличено в 320 раз



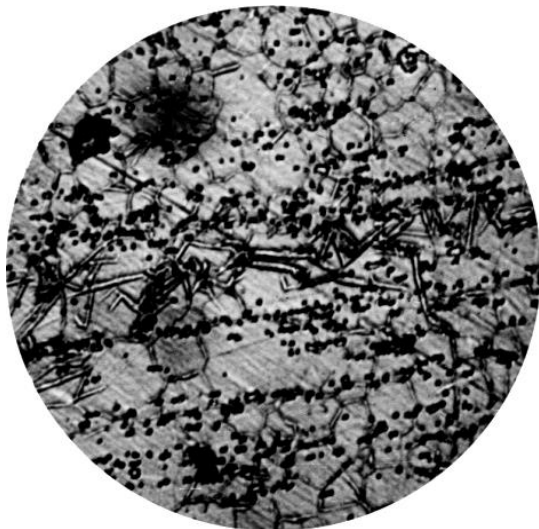
Увеличено в 440 раз

Рис.4. Влияние отпуска на структуру стали 95X18Ш, закалённой при значении температуры, равном 1200 °С, в течение 4 часов:
а – отпуск при 450 °С; б – отпуск при 600 °С

При дальнейшем повышении значения температуры отпуска начинается распад остаточного аустенита, причём распад аустенита протекает следующим образом: вначале происходит выделение карбидов хрома; вокруг карбида образуется область с пониженным содержанием хрома, и в этих областях происходит распад остаточного аустенита (см. рис. 5б) [3; 11].

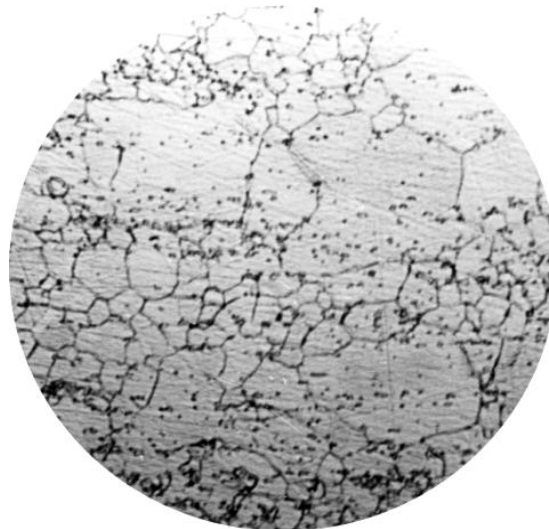
Вследствие выделения большого количества карбидов незначительно повышается твёрдость стали (см. рис. 2, а, б) [3; 11], при этом несмотря на высокую температуру отпуска в структуре стали ещё остаётся некоторое количество остаточного аустенита.

а)

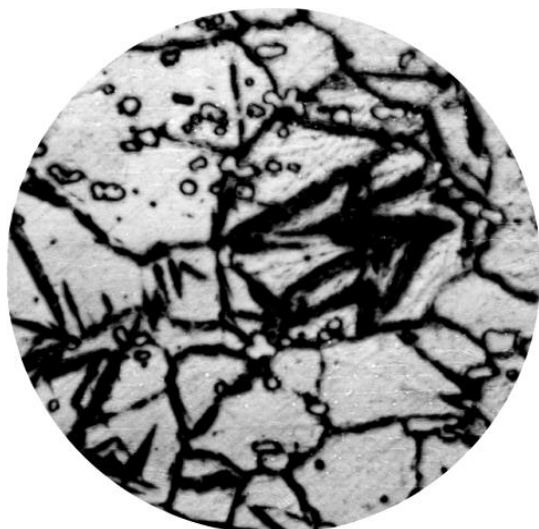


Увеличено в 120 раз

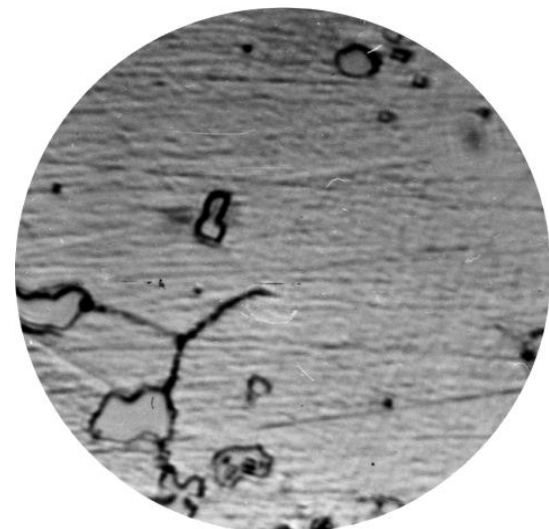
б)



Увеличено в 120 раз



Увеличено в 320 раз



Увеличено в 440 раз

Рис.5. Влияние отпуска на структуру стали 95X18Ш, закалённой при значении температуры, равном 1200 °С, в течение 30 минут:
а – отпуск (при 300 °С); б – отпуск (при 400 °С)

Вывод

На состояние остаточного аустенита оказывают большое влияние температура закалки, длительность старения, которое имеет место при вылёживании образца при комнатной температуре после закалки до отпуска и т. д. Эти факторы необходимо учитывать при изучении превращений остаточного аустенита при нагреве [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов, Г. В. Превращения в железе и стали / Г. В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – М.: Наука, 1977. – 273 с.
2. Усиков, М. П. Структурные превращения при низком отпуске углеродистого мартенсита / М. П. Усиков, Ф. Г. Хачатурян // Физика металлов и металловедение. – 1977. – Т. 43. – Вып. 3. – С. 554-561.
3. Отчёт по научно-исследовательской работе. Тема: «Исследование механизма образования, формы, размеров и площади карбидной фазы при обычном отпуске и тепловой обработке в вакууме на износостой-



- кость и долговечность шарнирных подшипников из стали 95X18Ш» / рук. В. А. Кораблев; исполн. В. А. Кораблев [и др.]. – Тюмень: Тюменский индустриальный институт (ТИИ) им. Ленинского комсомола, 1980. – 244 с.
4. Полянская, И. Л. Карбидная фаза стали 95X18Ш при обычном отпуске / И. Л. Полянская, Л. В. Белова, В. А. Кораблев // *Путь науки. Международный журнал.* – 2014. – № 8(8). – С. 70-72.
5. Белоус, М. В. Превращения при отпуске стали / М. В. Белоус, В. Т. Черепин, М. А. Васильев. – М.: *Металлургия*, 1973. – 230 с.
6. Лысак, Л. И. Физические основы термической обработки стали / Л. И. Лысак, Б. И. Николин. – Киев, 1975. – С. 95-98.
7. Криштал, М. А. Механизм диффузии в железных сплавах / М. А. Криштал. – М.: *Металлургиздат*, 1972. – 400 с.
8. Полянская, И. Л. Изучение процессов, протекающих в закалённых углеродистых сталях при низком отпуске: моногр. / И. Л. Полянская, В. А. Кораблев. – Тюмень: РИО ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ», 2015. – 80 с.
9. Новые материалы и технологии. Конструирование новых материалов и упрочняющих технологий / В. Е. Панин, В. А. Клименов, С. Г. Псахье [и др.]. – Новосибирск: ВО «Наука», 1993. – 152 с.
10. Кутсар А. Р. Изучение превращений при отпуске стали методом ЯГР / А. Р. Кутсар, Ю. А. Родионов, Г. Г. Исфандияров // *Физика металлов и металловедение.* – 1980. – Т. 49. – С. 645-648.
11. Полянская, И. Л. Изучение влияния температуры закалки на процессы, протекающие при отпуске углеродистых сталей / И. Л. Полянская, Л. В. Белова // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике.* – 2016. – № IV-1(28). – С. 97-103.
12. Кораблев, В. А. Изучение начальных стадий карбидообразования при отпуске закалённых углеродистых сталей / В. А. Кораблев, Н. Л. Венедиктов // *Термическая обработка, структура и свойства металлов. Межвузовский сборник.* – 1985. – Вып. 10. – С. 60-65.

Башков О. В., Ким В. А., Лончаков С. З., Физулаков Р. А., Белова И. В.
O. V. Bashkov, V. A. Kim, S. Z. Lonchakov, R. A. Fizulakov, I. V. Belova

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТАЛИ 12Х18Н10Т**

**STUDY OF DEFORMATION-TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS
OF STEEL 12X18H10T**

Башков Олег Викторович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; тел.: +7 (4217) 24-11-48; + 7 (914) 18-40-78. E-mail: bashkov@knastu.ru.

Mr. Oleg V. Bashkov – Doctor of Engineering, associate professor, head of Material Science and Technology of New Materials department of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: +7 (4217) 24-11-48; + 7 (914) 18-40-78. E-mail: bashkov@knastu.ru.

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: sinerg@mail.ru.

Mr. Vladimir A. Kim – Doctor of engineering, Professor of Material Science and Technology of New Materials department of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sinerg@mail.ru.

Лончаков Сергей Зиновьевич – старший научный сотрудник Центра коллективного пользования (ЦКП) Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Mr. Sergey Z. Lonchakov – Senior Researcher, Center for Collective Use (CCU) Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Физулаков Роман Анатольевич – заместитель начальника отдела новой техники ПАО «Компания “Сухой” “КнААЗ имени Ю. А. Гагарина”», кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: fizulakov@rambler.ru.

Mr. Roman A. Fizulakov – deputy head of department of the New equipment of PJSC Sukhoi Company, PhD in Engineering, associate professor Department of materials science and technology of new materials of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: fizulakov@rambler.ru.

Белова Инна Валерьевна – доцент кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Ms. Inna V. Belova – Associate Professor, Material science and technology of new materials department of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mtnm@knastu.ru.

Аннотация. В статье приведены результаты исследований по влиянию структурных и технологических факторов на деформационные дефекты, образующиеся при вальцовке тонкостенных труб малого диаметра из стали 12Х18Н10Т, и качество обработки. Показано, что химическая и структурная неоднородность в значительной степени влияет на качество готовых изделий и собранных сопряжений. Экспериментально установлено, что для обеспечения необходимого качества готовых изделий при вальцовке требований, предусмотренных ГОСТ 19277-73 «Трубы стальные бесшовные для маслопроводов и топливопроводов.



Технические условия», недостаточно. Дополнительными условиями обеспечения технологичности материала и заготовок при изготовлении конических участков труб вальцовкой являются размеры и геометрия зёрен, а также предел текучести или твёрдость исходного материала труб. С помощью алгоритмов компьютерной металлографии для количественной оценки микроструктуры были вычислены комплексные показатели структурной организации материала, таких как периметр границ зёрен и их площадь в плоскости сечения металлографического шлифа. Они учитывают размеры и форму кристаллитов, микропор, трещин и других микро- и мезомасштабных структурных объектов и их роль в формировании концентраторов внутренних напряжений. Определена количественная связь между состоянием исходной структуры трубчатой заготовки и механическими свойствами готовой детали. Локальная неоднородность пластической деформации материала связана с характером распределения микроструктурных объектов. Структурная неоднородность материала количественно может быть представлена бинарным полигоном распределения длины периметра и площади микроструктурных объектов, на которой чётко выделяются группы исходных заготовок с высокой и низкой технологичностью. Полученные результаты позволяют осуществлять входной контроль технологичности материала и прогнозировать качество обработки труб вальцовкой.

Summary. The article presents the results of studies of the influence of structural and technological factors on deformation defects produced when rolling thin-walled pipes of small diameter made of 12Kh18N10T steel and the quality of processing. It is shown that the chemical and structural heterogeneity significantly affects the quality of finished products and assembled interfaces. It has been experimentally established that to ensure the required quality of finished products when rolling requirements specified in GOST 19277-73 «Seamless steel pipes for oil and fuel lines. Technical conditions» is not enough. Additional conditions for ensuring the processability of the material and blanks in the manufacture of conical pipe sections by rolling are the dimensions and geometry of the grains, as well as the yield strength or hardness of the raw material of the pipes. Using computer-aided metallography algorithms to quantify the microstructure, complex indicators of the structural organization of the material, such as the perimeter of the grain boundaries and their area in the plane of the section of the metallographic section, were calculated. They take into account the size and shape of crystallites, micropores, cracks and other micro and mesoscale structural objects and their role in the formation of internal stress concentrators. A quantitative relationship between the state of the initial structure of the tubular billet and the mechanical properties of the finished part is determined. The local inhomogeneity of the plastic deformation of the material is due to the nature of the distribution of microstructural objects. Structural heterogeneity of the material can be quantitatively represented by a binary polygon of the distribution of the perimeter length and the area of microstructural objects, on which groups of initial blanks with high and low manufacturability are clearly distinguished. The obtained results allow to carry out the input control of the material's processability and to predict the quality of the pipe processing by rolling.

Ключевые слова: высоколегированная сталь 12X18H10T, деформация, вальцовка, микротвёрдость, аустенитное зерно, балл зерна.

Key words: high-alloy steel 12X18H10T, deformation, rolling, micro hardness, austenite grain, grain size.

УДК 669.295: 621.7

Введение

При развальцовке цилиндрического участка заготовки в конический вид материал подвергается сложной пластической деформации, неоднородно распределённой по толщине и длине обрабатываемой зоны. Формоизменение при развальцовке осуществляется за счёт локального растяжения, при этом учитывается, что получаемое изделие относится к категории ответственных и точных; степень пластической деформации должна иметь строго заданную величину в определённых поперечных сечениях. Численные значения реальной степени пластической деформации можно определить измерением диаметральных размеров полученной детали по формуле

$$e = \ln \left(\frac{d_i}{d_0} \right), \text{ где } d_i - \text{ диаметр трубки в } i\text{-ом сечении; } d_0 - \text{ исходный диаметр трубки.}$$

Качество формируемого сопряжения будет зависеть от режимов деформационной обработки и исходного состояния заготовки, определяющих структуру готовой детали и его физико-

механические свойства. Исходная трубчатая заготовка обладает структурной и химической неоднородностью, погрешностью размеров и формы, регламентированных соответствующими допусками [7; 6]. В результате свойства получаемого изделия при соблюдении всех технологических режимов и норм могут различаться между собой, и это отражается на эксплуатационных показателях готового сопряжения.

В статье приведены результаты исследований влияния исходной структурной неоднородности трубчатых заготовок из нержавеющей стали 12Х18Н10Т на качество изделия, получаемого развальцовкой.

Методика исследований

Трубчатые заготовки диаметром 6,0 мм, толщиной 1,0 и 0,8 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т подвергались развальцовке обкаткой тремя роликовыми наконечниками.

Механические свойства исходной заготовки определялись диаграммой растяжения, полученной на испытательной электромеханической машине INSTRON 3382 (США). Химический состав материала определялся оптико-эмиссионным спектроанализатором Q4 TASMAR 170 (Bruker, Германия). Химический состав нержавеющей стали 12Х18Н10Т регламентируется ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки» (п. 2.2. ГОСТ 19277-73 «Трубы стальные бесшовные для маслопроводов и топливопроводов. Технические условия»).

Металлографические шлифы готовились по традиционной технологии и травились реактивом, состоящим из глицерина, соляной и азотной кислот в соотношении 4:4:3 [1]. Цифровые изображения микроструктур были получены на металлографическом микроскопе «Микро-200» при степени увеличения, равной 400 крат. Для анализа структурного состояния материала использовались результаты компьютерной обработки изображений микроструктур с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1 [3; 4]. Компьютерная обработка включала корректировку резкости изображения, калибровку с учётом кратности увеличения, снятие контрастной маски, выделение границ зёрен и раздела фаз, вычитание фона в случае его неоднородности, вычисление периметра (P_i) и площади (S_i) каждого зерна или другого микроструктурного образования.

По результатам измерений количественных показателей P_i и S_i рассчитывалась такая комплексная характеристика, как плотность границ зёрен: $q = \frac{\sum P_i}{\sum S_i}$.

В расчёте использовались все микроструктурные объекты, зафиксированные на одном снимке, общее количество которых составило от 200 до 1200 штук.

Микроструктура материала в исходном состоянии и после обработки исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа HITACHI S-3400N (Япония). На полученных изображениях более чётко выявлялись микроструктурные дефекты и рельеф шлифа, сформированный после его травления. По степени травления можно косвенно судить о величине химического потенциала микроструктурного объекта [5].

Результаты исследований и их обсуждение

На основании механических испытаний исходных заготовок был построен полигон их распределения по пределу прочности и относительному удлинению (см. рис. 1). Выборка включала 16 трубчатых заготовок толщиной 0,8 и 1,0 мм.

Полученное распределение отражает общую закономерность: с повышением предела прочности имеет место снижение относительного удлинения. Сочетание этих двух характеристик определяет технологичность и эксплуатационную надёжность любого материала. Высокий предел прочности обеспечивает эксплуатационную надёжность материала, а низкий – повышенную технологичность. Большая величина относительных удлинений характеризует высокую формоустойчивость и сопротивляемость материала к разрушению при деформации [6].

Заготовки с высокой технологичностью характеризуются относительно низким пределом прочности (или пределом текучести) и повышенной величиной относительного удлинения. Они были объединены в отдельную группу (выделены на полигоне распределения прямоугольной зоны) (см. рис. 1). Остальные заготовки представляли группу с низкой технологичностью.

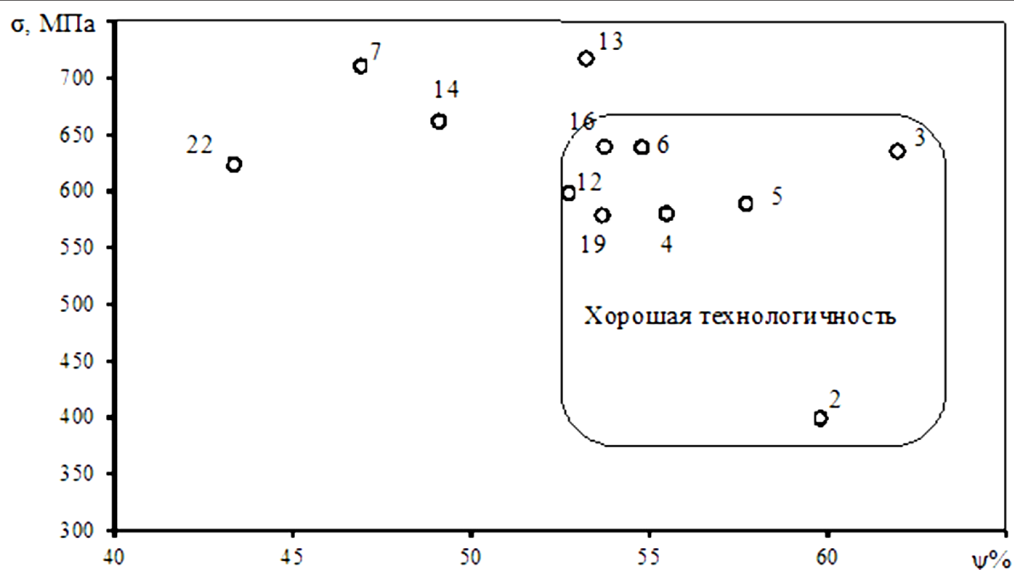


Рис. 1. Полигон распределения трубчатых заготовок по пределу прочности и относительному удлинению: \diamond – $h=0,8$ мм; \circ – $h = 0,8$ мм

Химический состав материала показал, что заготовки с низкой технологичностью имеют незначительное превышение содержания фосфора относительно рекомендуемого стандартом. Фосфор – вредная примесь, находящаяся в стали в виде соединения Fe_3P и образующая легкоплавкие соединения, скапливающиеся при кристаллизации сплава, как правило, по границам зёрен, ослабляя связь между ними. Фосфор оказывает вредное влияние на механические свойства, придавая стали хрупкость в холодном состоянии (хладноломкость). Наличие фосфора в исследованных образцах стали 12X18H10T в количестве, превышающем предельно допустимую норму согласно ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки», может оказывать влияние на качество вальцовки труб.

Типичные микроструктуры заготовок в исходном состоянии с высокой и низкой технологичностью представлены на рис. 2.

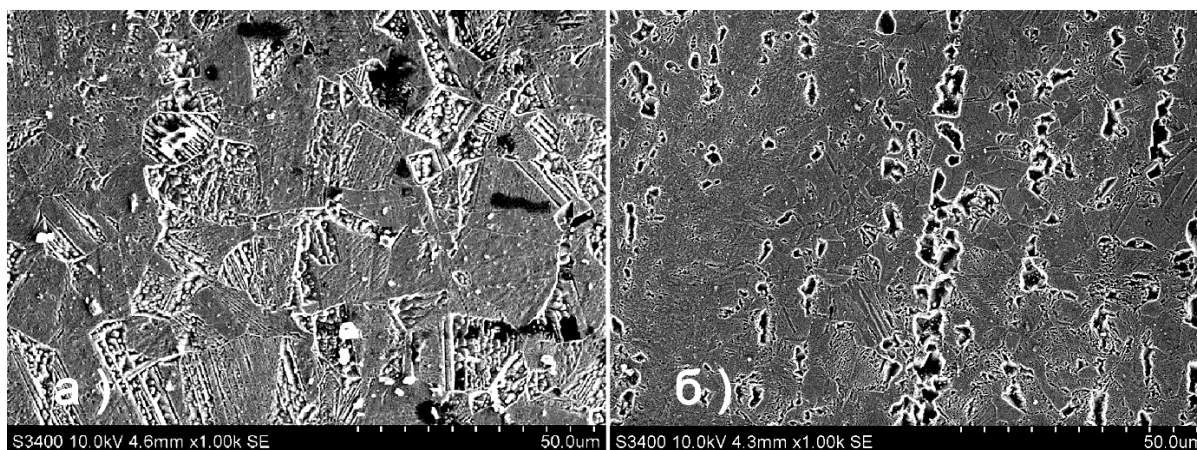


Рис. 2. Микроструктуры образцов:
а – с высокой технологичностью; б – с низкой технологичностью

Исходная микроструктура заготовок с высокой технологичностью характеризуется относительно крупными аустенитными зёрнами, разделёнными границами, имеющими чётко выраженные прямолинейные участки, а тройные стыки имеют углы около 120° . Это всё указывает на то,

что структура отличается равновесностью, то есть рост зёрен от центров кристаллизации проходил с близкими по величине скоростями, а сами кристаллиты имели близкие по величине химические потенциалы.

На фотографиях просматривается кристаллографическая ориентация зёрен и субзёрненная структура, имеющая как полигональные, так и ячеистые субграницы.

Микроструктура заготовок с низкой технологичностью отличается относительно мелким зерном, средний размер кристаллита составляет 10...20 мкм. Границы зёрен плохо протравливаются, что косвенно указывает на их слабую подвижность. Пластическая деформация будет протекать преимущественно за счёт деформационных процессов в кристаллитах, а не путём зернограничного скольжения. Такая пластическая деформация требует больших энергетических затрат, поэтому данная структура показала наиболее высокую величину предела прочности при растяжении. Малое количество тройных стыков с равновесными углами является отражением неоднородности распределения химических потенциалов в смежных кристаллитах. Присутствие в микроструктуре зон активного химического растворения, вызванного травлением, доказывает, что в микроструктуре имеются концентраторы напряжений, расположенные преимущественно по границам зёрен и образующие параллельную полосчатость. Такое распределение концентраторов напряжений характерно для структур, получаемых прокаткой, в которых внутренние напряжения не были минимизированы последующей термической обработкой. В целом такую структуру исходной заготовки можно охарактеризовать как плотную, обладающую высокими прочностными свойствами, но плохо поддающейся пластической деформации.

На рис. 3 показана микроструктура, полученная в результате развальцовки в области максимальных пластических деформаций. Структура образцов с высокой технологичностью после деформации отличается однородностью, отсутствием несплошностей и микротрещин как на поверхности, так и в глубине. В слоях, примыкающих к внутренней поверхности, видна текстура деформации, ориентированная параллельно оси деформации. Пластическая деформация вдоль поверхности раскатки носит однородный характер, а по глубине – градиентный. Характер изменения деформации по глубине можно проанализировать по плотности линий текстуры. Текстурные линии травления также могут наблюдаться на образцах, подверженных циклической деформации [2]. Более высокая плотность текстуры у поверхности обеспечивает за счёт деформационного упрочнения высокую прочность контактных поверхностей в формируемом сопряжении, что также повышает качество самой развальцовки. В результате развальцовки формируется качественное сопряжение.

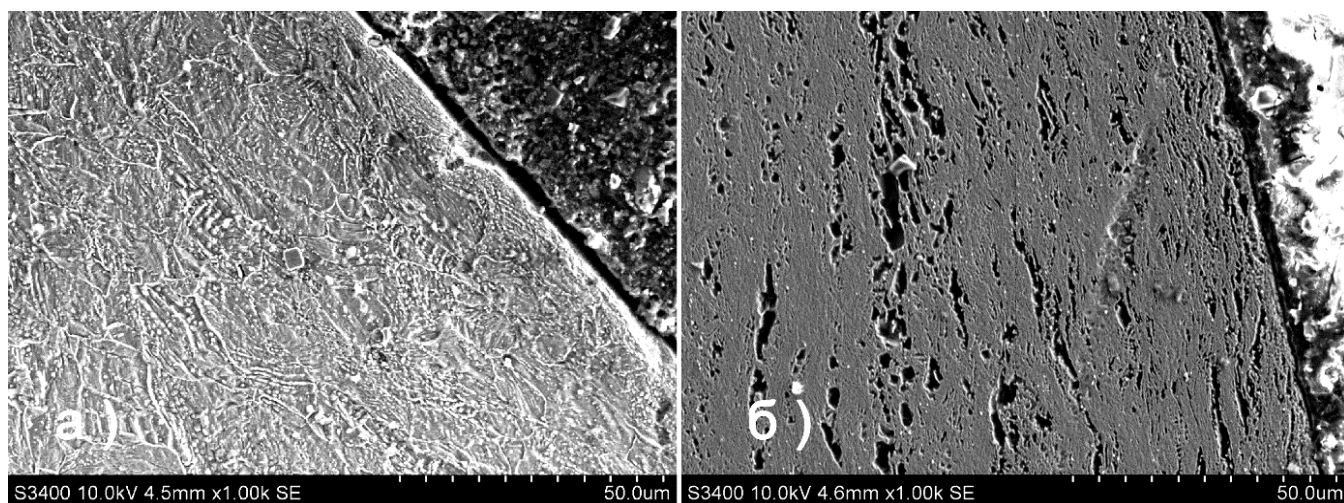


Рис. 3. Микроструктуры образцов после развальцовки в зоне наиболее высокой пластической деформации: а – с высокой технологичностью; б – с низкой технологичностью

Отличительной особенностью микроструктур, сформированных пластической деформацией заготовок из группы с низкой технологичностью, является высокая плотность концентраторов напряжений и микротрещин, ориентированных параллельно плоскости обкатки раскатными роликми. В поверхностной зоне выделяется верхний слой, в котором наблюдаются следы наиболее активных пластических деформаций. Этот слой отличается повышенной концентрацией зон активного вытравливания, расположенных в ряд параллельно поверхности развальцовывания, и мелкозерённым строением. Под этим слоем располагаются вытянутые зоны активного травления и, возможно, микротрещин, которые, к сожалению, не поддаются идентификации. Далее следует широкая область со следами активной пластической деформации. Если в верхнем слое зернистость и кристаллографическая ориентация кристаллитов не просматривается из-за высокой пластической деформации, то в нижних слоях видны сильно деформированные зёрна, среди которых встречаются такие, у которых видна их кристаллографическая ориентация.

Неоднородность пластической деформации проявляется в локальности этого процесса по глубине в виде слоёв, параллельных плоскости развальцовки. Низкое качество обработки определяется низкой пластичностью исходной структуры, образующей при пластической деформации несплошности разномасштабных уровней и множество концентраторов напряжений.

Для количественного описания структурной организации материала были построены полигоны распределения микроструктур объектов исходных заготовок по их периметрам и площадям, что и изображено на рис. 4.

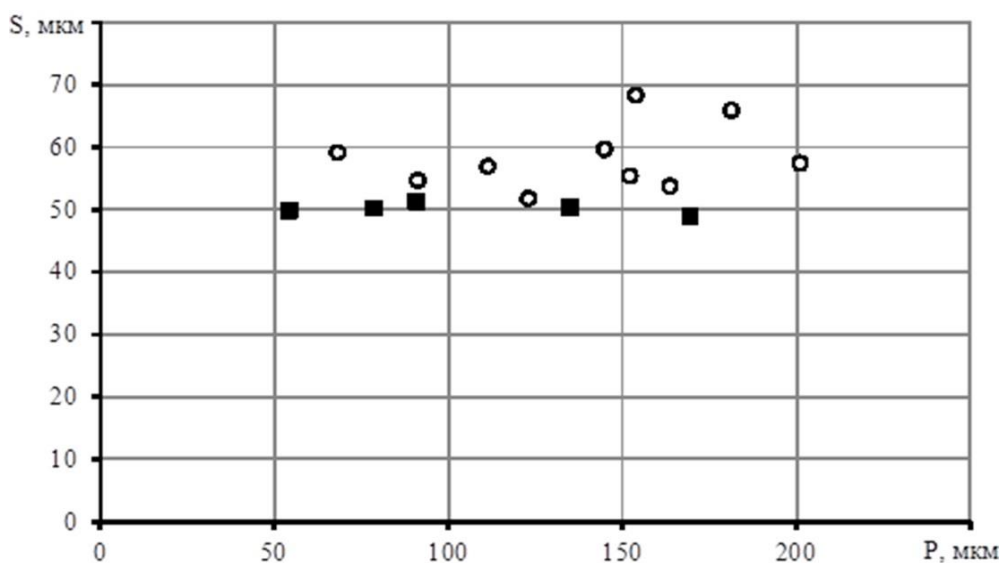


Рис. 4. Распределение площадей и периметров зёрен: ○ – микроструктуры с высокой пластичностью; ■ – микроструктуры с низкой пластичностью

Полученные результаты наглядно демонстрируют отличительную особенность структурной организации материалов. Видно, что диапазон распределения зёрен микроструктуры с высокой пластичностью по периметру отличается незначительно, а по площадям характеризуется большими значениями. На основании приведённых результатов можно заключить, что высокая пластичность наблюдается у крупнозёрненных микроструктур, средний диаметральный размер которых превышает 7,0 мкм (площадь более 50 мкм²).

Кристаллиты малых размеров определяют более короткий путь скольжения линейных дефектов кристаллического строения при пластической деформации. Это приводит к повышению прочности материала, усилению его склонности к деформационному упрочнению и снижает технологичность.

Заключение

Качество изделия, получаемого развальцовкой, в значительной степени зависит от исходного состояния структуры заготовки. Неоднородность структурного состояния является основной причиной появления изделий низкого качества или непригодных для использования.

Исходный химический состав стали может оказывать большое влияние на технологичность при пластической деформации и, в частности, на качество вальцовки. Превышение предельного содержания фосфора в образцах труб может являться причиной охрупчивания и образования чешуек (лямелей) при развальцовке труб стали 12Х18Н10Т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
2. Исследование кинетики накопления усталостных повреждений в титановом сплаве методом акустической эмиссии / О. В. Башков, В. А. Ким, А. И. Евстигнеев, А. А. Попкова, Т. И. Башкова // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 4. – С. 41-47.
3. Ким, В. А. Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов / В. А. Ким, И. В. Белова, С. В. Золоторева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 4. – С. 43-46.
4. Ким, В. А. Исследование структурных изменений при пластической деформации стали 20 / В. А. Ким, О. В. Башков, А. А. Попкова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. – Т. 82. – № 1. – С. 32-36.
5. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. П. Бондарь [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
6. Приоритеты авиационных технологий. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. А. Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2004. – 696 с.
7. Inhomogeneity of the hot deformation of austenitic steel / M. V. Temlyantsev, M. V. Filippova, V. N. Peretyat'ko, S. V. Konovalov // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – Is. 4. – P. 255-257.



Пячин С. А., Бурков А. А., Мокрицкий Б. Я., Власова Н. М.
S. A. Pyachin, A. A. Burkov, B. Ya. Mokritskii, N. M. Vlasova

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ Ti_3Al ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ДОБАВКИ B_4C И ТЕМПЕРАТУРЫ ОТЖИГА

PROPERTIES OF Ti_3Al ELECTROSPARK COATINGS DEPENDING ON B_4C ADDITIVE CONCENTRATION AND ANNEALING TEMPERATURE

Пячин Сергей Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией функциональных материалов и покрытий Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; тел.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: pyachin@mail.ru.

Mr. Sergei A. Pyachin – Doctor in Physical and Mathematical Sciences, associate Professor, head of laboratory of functional materials and coatings, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, 153 Tikhookeanskaya str.; tel.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: pyachin@mail.ru.

Бурков Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; тел.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: burkovalex@mail.ru.

Mr. Alexander A. Burkov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, researcher, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, 153 Tikhookeanskaya str.; tel.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: burkovalex@mail.ru.

Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritskii – Doctor of Engineering, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: boris@knastu.ru.

Власова Нурия Мунавировна – кандидат технических наук, научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; тел.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: vlasova64@yandex.ru.

Ms. Nuriya M. Vlasova – PhD in Engineering, researcher, Institute of Materials, Far Eastern Branch, the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); 680042, Khabarovsk, 153 Tikhookeanskaya str.; tel.: + 7 (4212) 22-56-98. E-mail: vlasova64@yandex.ru.

Аннотация. Изучено влияние отжига в вакууме на характеристики электроискровых покрытий из алюминидов титана Ti_3Al с добавками B_4C на титановом сплаве $Ti6Al4V$. Установлено, что составы осаждённых слоёв изменяются после нагрева при температурах выше $600\text{ }^\circ\text{C}$ за счёт образования оксида титана TiO и снижения концентрации боридов TiB и TiB_2 . В результате высокотемпературного отжига микротвёрдость покрытия $Ti_3Al+5\%B_4C$ возросла в 2,3 раза, а износостойкость электроискровых $Ti_3Al+10\%B_4C$ покрытий – в 3 раза. Коэффициент трения всех покрытий снизился на 10 – 15 %.

Summary. The effect of vacuum annealing on the characteristics of titanium aluminide Ti_3Al coatings with B_4C additives on $Ti6Al4V$ titanium alloy was investigated. It was established that the compositions of the deposited layers changed after annealing at temperatures above $600\text{ }^\circ\text{C}$ due to the formation of titanium oxide TiO and the decrease in the concentrations of borides TiB and TiB_2 . Due to the high-temperature annealing, the microhardness of the $Ti_3Al+5\% B_4C$ coating increased in 2.3 times, and the wear resistance of the electric spark $Ti_3Al+10\% B_4C$ coating increased in 3 times. The friction coefficient of all coatings decreased by 10 – 15%.

Ключевые слова: электроискровое легирование, покрытие, интерметаллид, карбид бора, состав, отжиг, микротвёрдость, износостойкость.

Key words: electrospark alloying, coating, intermetallic, boron carbide, composition, annealing, microhardness, wear resistance.

УДК 621.762;537.523.4

Введение

Титановые сплавы применяют в различных отраслях промышленности (аэрокосмической, автомобильной, биомедицинской и др.) благодаря их коррозионной стойкости, малому удельному весу, высокой прочности и биосовместимости [2; 20]. Тем не менее изделия из титана не лишены недостатков, к которым относятся высокая вязкость при трении, низкая термостойкость и высокая температура охрупчивания. Свойства титановых сплавов можно улучшить модифицированием их состава и структуры, а также нанесением защитных покрытий [1; 4; 8]. При выборе материалов для нанесения покрытий на титан предпочтительны алюминиды титана, которые обладают высокой адгезией и устойчивостью к воздействию высоких температур и агрессивных сред [3; 13; 14; 19; 15; 18]. Эффективность интерметаллидных слоёв можно повысить добавлением жаростойких и упрочняющих соединений, таких как оксиды циркония, титана [21], нитриды хрома, никеля, титана [11; 16], карбиды тантала и бора [10; 17].

Метод электроискрового легирования перспективен для формирования интерметаллидных покрытий на основе сплавов титана с алюминием [5]. Электроискровое осаждение алюминида Ti_3Al с добавками TiC и V_4C на сплав VT20 повышает его устойчивость к газовой коррозии при температуре 900 °С и износостойкость поверхности титанового сплава в 4 – 6 раз [6; 7]. Проведённые исследования были нацелены на изучение влияния концентрации добавки карбида бора и температуры изотермического отжига на фазовый состав и характеристики электроискровых покрытий из интерметаллида Ti_3Al на титановом сплаве $Ti6Al4V$.

Материалы и методы исследования

Электроискровые покрытия получены с использованием установки IMES-40 с ручным электромагнитным вибратором и генератором импульсов тока. Легирующие электроды были изготовлены перемешиванием порошков Ti и Al в мольном соотношении 3:1 и карбида V_4C в количестве 5, 10, 15 масс. %) с последующим спеканием в вакууме при температуре 1400 °С. Составы спечённых электродов отличались от составов исходных порошков (см. табл. 1), что объясняется твердофазным химическим взаимодействием карбида бора с титаном и алюминием в условиях высоких температур с образованием соединений – карбида и диборида титана, а также сложного карбида $Ti_4Al_2C_2$. Содержание последнего растёт с ростом концентрации V_4C в исходной смеси порошков. Покрытия нанесли на подложки из титанового сплава $Ti6Al4V$ (Ti – 88,1...90,4 %; Al – 5,5...6,75 %; V – 3,5...4,5 %; Fe – 0,4 %; O – 0,1 %). Подложки имели форму дисков диаметром 12 мм и высотой 5 мм. Во время осаждения покрытий электроды обдували аргоном, чтобы избежать окисления металлов. Частота повторения импульсов тока – 1 кГц, длительность импульсов – 100 мкс, амплитуда импульсов тока – 110 ± 10 А при напряжении между электродами 30 ± 5 В. Продолжительность осаждения покрытий – 5 мин.

Таблица 1

Фазовые составы электродов и покрытий*

Обозначение	Электрод	Покрытие
Ti_3Al	Ti_3Al	TiN , Ti_3Al
$Ti_3Al+5\%V_4C$	Ti_3Al , TiB_2 , TiC	TiB , Ti_3Al , αTi , TiB_2
$Ti_3Al+10\%V_4C$	Ti_3Al , TiB_2 , TiC , $Ti_4Al_2C_2$	TiB , TiB_2 , Ti_3Al , αTi
$Ti_3Al+15\%V_4C$	$Ti_4Al_2C_2$, Ti_3Al , TiB_2 , TiC	TiB_2 , TiB , αTi , Al_2O_3 , Ti_3Al

*Примечание – Соединения указаны в порядке убывания концентрации

Термическая обработка (ТО) титанового сплава с покрытиями проводилась следующим образом: образцы нагревали и выдерживали при температуре из диапазона 500 – 1100 °С в течение 1 часа в вакуумной печи Carbolite STF при остаточном давлении 1,3 Па. Затем печь выключали, и образцы медленно остывали до комнатной температуры.

Микроструктуру покрытий исследовали с применением сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA с энергодисперсионным спектрометром X-MAX в центре коллективного пользования Института тектоники и геофизики имени Ю. А. Косыгина ДВО РАН. Фазовый состав электродов и покрытий определяли с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в излучении Си-Ка. Рентгеновские линии идентифицировали с использованием программы PDWin и базы PDF-2 Международного центра дифракционных данных ICDD.

Стойкость покрытий к истиранию оценивали в соответствии со стандартом ASTM G99-04 в режиме скольжения по поверхности контртела – вращающегося диска из быстрорежущей стали Р6М5. Скорость вращения диска – 720 об/мин. Давление на испытуемый образец – 25 Н. Общая длина пути скольжения – 11 км. Потерю массы образцов из-за истирания определяли с помощью электронных весов с точностью 0,1 мг. Износостойкость рассчитывали как величину, обратную к интенсивности весового изнашивания, равную отношению потери массы образца при трении к длине пути скольжения.

Электрохимические измерения проводились с применением потенциостата 8Р-папо в трёхэлектродной ячейке с естественной аэрацией. В качестве тестового электролита использован 3,5%-й раствор NaCl при температуре 25 °С, а в качестве электрода сравнения – стандартный хлорсеребряный электрод в растворе KCl. Контрэлектрод – платиновый «ЭТП-02». Титановый сплав Ti6Al4V без покрытий и с покрытиями служил рабочим электродом. Перед началом поляризационного сканирования образцы катода поляризовались при 1 В в течение 5 мин с последующей стабилизацией в течение 1 часа. Сканирование осуществлялось в диапазоне от -1,5 В до 2,0 В со скоростью 1 мВ/с. Активная экспозиция к используемым растворам электролита составляла 1 см². Поляризационные параметры определены экстраполяцией катодных и анодных наклонов кривых Тафеля с использованием метода Стерна – Гири.

Результаты и обсуждение

Согласно металлографическому и микрорентгеноспектральному анализу покрытие представляет собой композиционный материал, состоящий из металлической матрицы с включениями (см. рис. 1).

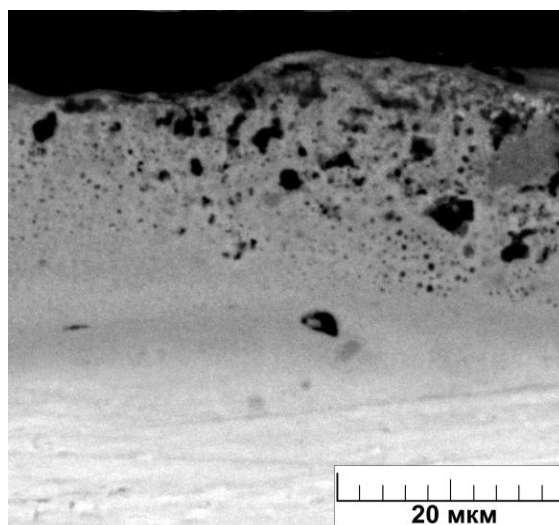


Рис. 1. СЭМ-изображение сечения покрытия Ti₃Al+15%B₄C на сплаве Ti6Al4V до отжига

Тёмные области соответствуют повышенной концентрации алюминия и кислорода, то есть оксида алюминия Al₂O₃, а области серого цвета – это сосредоточение титана и бора, то есть бориды титана TiB₂. С увеличением расстояния от поверхности вглубь подложки содержание бора

снижается с 40 до 5 ат. %, а концентрация титана возрастает с 20 до 80 ат. %. Средняя толщина осаждённых слоёв уменьшается с 70 мкм для Ti_3Al -покрытия до 24 мкм для $Ti_3Al+15\%B_4C$ покрытия по мере роста концентрации B_4C .

Фазовые составы электроискровых покрытий отличаются от электродов, с применением которых они были получены (см. табл. 1). Покрытие Ti_3Al помимо основного интерметаллида Ti_3Al содержит нитрид титана TiN , образовавшийся в результате взаимодействия титана с азотом, который содержался в потоке защитного газа. В покрытиях $Ti_3Al+5\%B_4C$ и $Ti_3Al+10\%B_4C$ преобладает моноборид титана TiB . При повышении концентрации бора в анодном материале концентрация диборида TiB_2 в осаждённом слое заметно увеличивалась по сравнению с TiB . В покрытиях $Ti_3Al+10\%B_4C$ и $Ti_3Al+15\%B_4C$ также присутствует $\alpha-Ti$, который проникает из титановой подложки в поверхностный слой. Покрытие $Ti_3Al+15\%B_4C$ содержит также незначительное количество оксида алюминия Al_2O_3 .

Фазовые составы электроискровых полученных покрытий не претерпевают значительных изменений при нагреве до 600 °С, однако дальнейшее повышение температуры отжига приводит к окислению компонентов осаждённых слоёв. Так, в поверхностном слое из Ti_3Al без добавок после отжига при температурах более 600 °С образуется оксид титана Ti_2O_3 , а при температурах выше 800 °С – TiO (см. рис. 2, а). Окисление металлов возможно благодаря наличию кислорода как примеси в титановом сплаве и присутствию его в разрежённом воздухе при давлении 1,3 Па.

Примечательно также, что алюминий выявляется в покрытии Ti_3Al как отдельная фаза после отжига при температурах выше 700 °С, то есть при превышении его температуры плавления. При этом содержание интерметаллида Ti_3Al падает. В покрытиях Ti_3Al с добавками карбида бора рост температуры изотермического нагрева выше 600 °С сопровождается падением концентрации боридов TiB и TiB_2 с одновременным увеличением концентрации оксида титана TiO (см. рис. 2, б – г).

Микротвёрдость осаждённых $Ti-Al-B-C$ покрытий равна 6,6 – 8,9 ГПа (см. табл. 2), что выше в 2-3 раза, чем у подложки – сплава $Ti6Al4V$ (3 ГПа). Сравнивая микротвёрдость покрытий до и после отжига, можно сделать заключение, что она слабо изменяется в результате термической обработки. Исключение составляет покрытие $Ti_3Al+5\%B_4C$ на титановом сплаве $Ti6Al4V$. Его микротвёрдость в 2,3 раза больше, чем у аналогичного покрытия, не подвергнутого отжигу.

Таблица 2

Микротвёрдость (HV), износостойкость (W) и коэффициент трения (μ) электроискровых покрытий без и после отжига при 1100 °С

Характеристика		Покрытие			
		Ti_3Al	$Ti_3Al+5\%B_4C$	$Ti_3Al+10\%B_4C$	$Ti_3Al+15\%B_4C$
HV , ГПа	Без ТО	$6,6 \pm 1,2$	$8,4 \pm 1,3$	$8,9 \pm 1,4$	$8,3 \pm 1,3$
	После ТО	$8,1 \pm 1,1$	$19,6 \pm 2,1$	$8,1 \pm 1,2$	$8,4 \pm 1,1$
W , км/мг	Без ТО	$6,6 \pm 0,5$	$7,7 \pm 1,8$	$7,6 \pm 1,6$	$13,6 \pm 3,1$
	После ТО	$3,2 \pm 0,6$	$3,6 \pm 0,4$	$22,5 \pm 4,1$	$11,7 \pm 2,3$
μ	Без ТО	0,52 – 0,59	0,48 – 0,57	0,48 – 0,55	0,46 – 0,52
	После ТО	0,49 – 0,54	0,43 – 0,52	0,39 – 0,47	0,40 – 0,47

В режиме скользящего изнашивания титанового сплава относительно стали Р6М5 реализуются окислительный и адгезионный механизмы износа. Испытания образцов в режиме сухого скольжения показали, что за счёт осаждения электроискровых покрытий на титановый сплав $Ti6Al4V$ удаётся значительно улучшить его износостойкость. Износостойкость непокрытого титанового сплава составляет 0,075 км/мг, а износостойкость сплава с покрытиями – выше 6,6 км/мг (см. табл. 2). Влияние изотермического отжига на износ образцов не так однозначно. Для покрытий Ti_3Al , $Ti_3Al+5\%B_4C$, $Ti_3Al+15\%B_4C$ износостойкость после термической обработки снижается в 1,2 – 2,2 раза, а для покрытия $Ti_3Al+10\%B_4C$ – увеличивается в 3,3 раза.

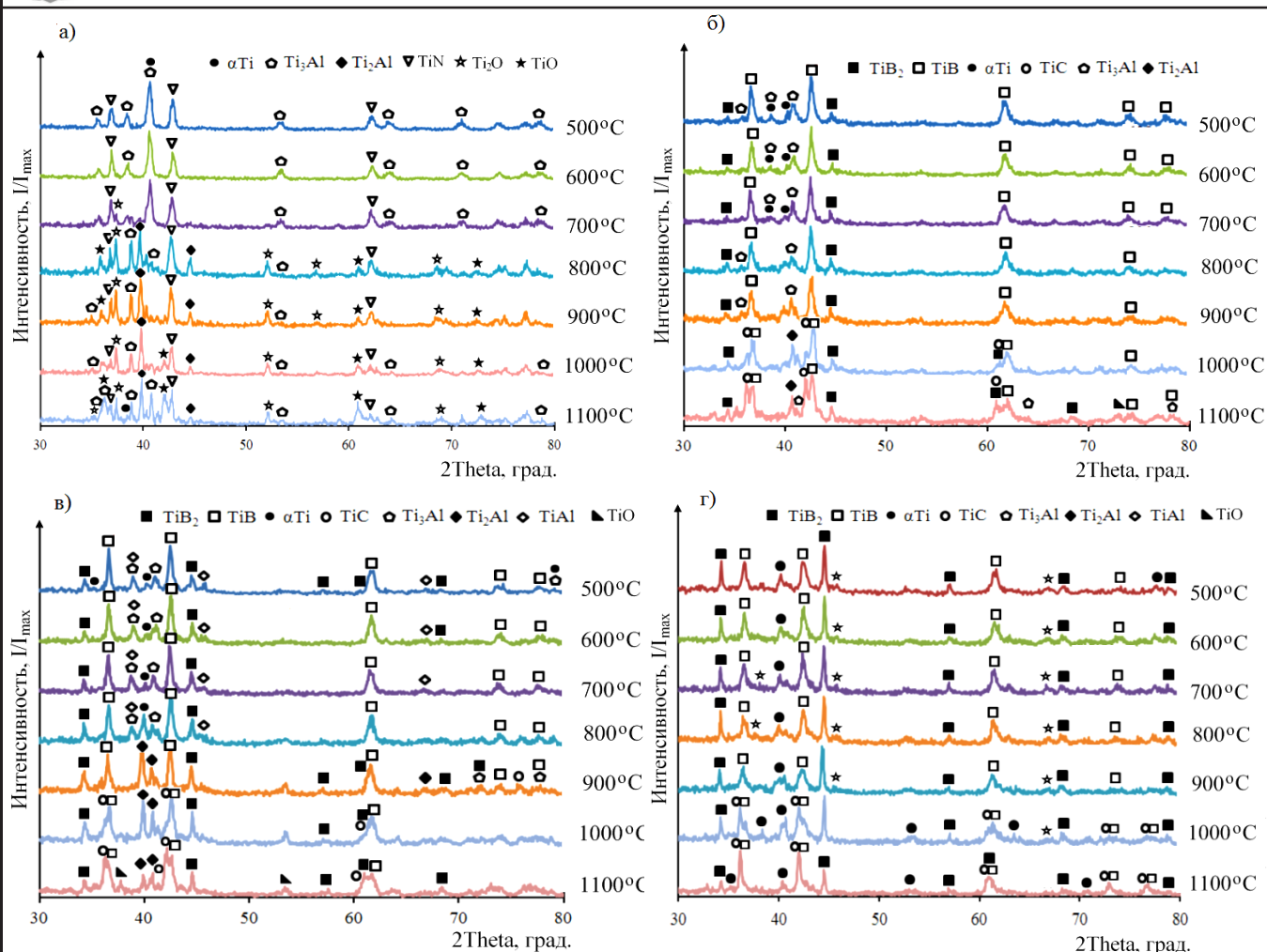


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы покрытий после отжига при разных температурах:
а – Ti_3Al ; б – $Ti_3Al+5\%B_4C$; в – $Ti_3Al+10\%B_4C$; г – $Ti_3Al+15\%B_4C$

Коэффициент трения полученных покрытий (см. табл. 2) после 2 км длины пути истирания принимает значения в диапазоне 0,46 – 0,59. Наблюдается тенденция к снижению коэффициента трения с увеличением концентрации добавки карбида бора. После изотермического отжига коэффициент трения образцов уменьшается на 10 – 15 %.

Результаты потенциодинамических поляризационных испытаний образцов с покрытиями (см. рис. 3, а и табл. 3) показали, что добавка карбида бора снижает E_{corr} для Ti_3Al покрытий. Однако I_{corr} повышается с ростом содержания добавки в 4,5 раза, а R_p снижается почти в 3 раза для образцов Ti_3Al и $Ti_3Al+15\%B_4C$, что свидетельствует об ухудшении коррозионной стойкости Ti_3Al покрытий с повышением содержания бора и углерода. После отжига образцов при температуре 1100 °С наблюдаются аналогичные закономерности: ток коррозии повышается, а сопротивление поляризации уменьшается с ростом содержания бора и углерода в покрытиях. Анализ результатов поляризационных испытаний образцов до и после высокотемпературной выдержки показал, что отжиг образцов приводит к повышению I_{corr} и снижению R_p в 1,4 – 4,6 и 1,4 – 5 раз соответственно. При отжиге образцов также наблюдалось повышение потенциала коррозии на 10 %. Таким образом, полученные электрохимические параметры показывают снижение коррозионной стойкости покрытий на основе интерметаллида Ti_3Al с добавками карбида бора после отжига при температуре 1100 °С. Аналогичное поведение титановых сплавов при отжиге наблюдалось ранее [9; 12]. В работе [9] было показано, что отжиг титанового сплава Ti_6Al_4V при температуре 800 °С приводит к повышению I_{corr} в 2,3 раза и снижению R_p в 3 раза.

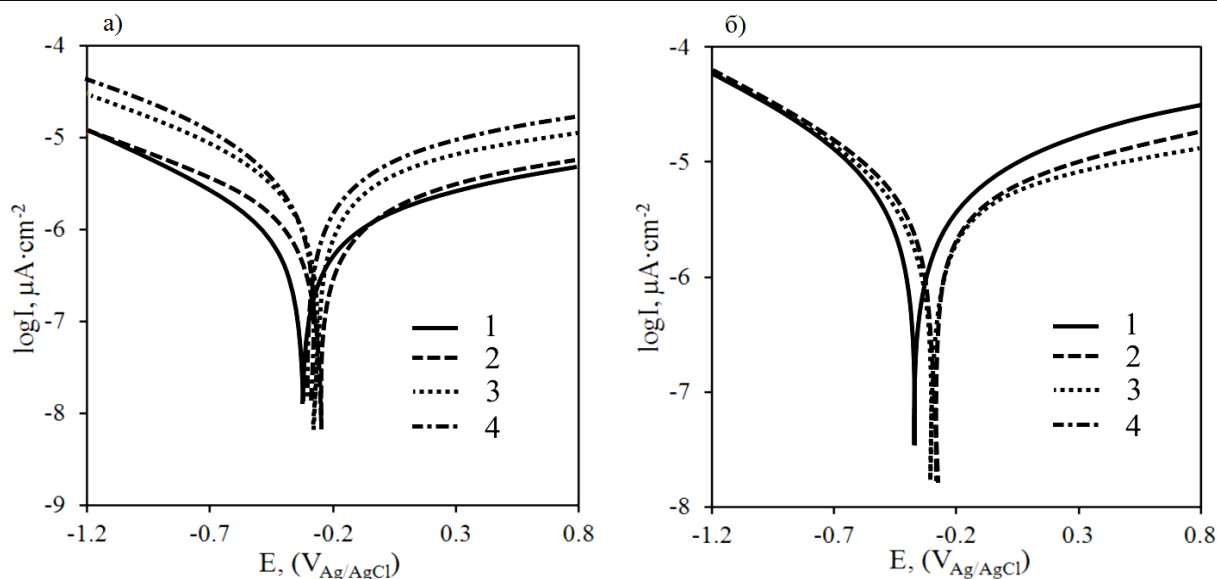


Рис. 3. Потенциодинамические поляризационные кривые электроискровых покрытий:
 а – без отжига; б – после отжига при температуре 1100 °С.
 Обозначения линий: 1 – покрытие Ti_3Al ; 2 – покрытие $Ti_3Al+5\%B_4C$;
 3 – покрытие $Ti_3Al+10\%B_4C$; 4 – покрытие $Ti_3Al+15\%B_4C$

Таблица 3

Потенциал коррозии (E_{corr}), плотность тока коррозии (I_{corr}) и поляризационное сопротивление (R_p) электроискровых покрытий без и после отжига при 1100 °С

Характеристика		Покрытие			
		Ti_3Al	$Ti_3Al+5\%B_4C$	$Ti_3Al+10\%B_4C$	$Ti_3Al+15\%B_4C$
E_{corr} , В	Без ТО	-0,32	-0,25	-0,26	-0,29
	После ТО	-0,37	-0,28	-0,30	-0,28
I_{corr} , мкА/см ²	Без ТО	0,84	1,29	3,10	3,80
	После ТО	3,89	4,94	4,46	5,26
R_p , кОм	Без ТО	321	354	119	111
	После ТО	193	72	71	77

Выводы

Изотермический нагрев электроискровых Ti_3Al покрытий с добавками карбида бора на титановом сплаве $Ti6Al4V$ выше 600 °С в вакууме приводит к изменению их фазового состава. В поверхностном слое из интерметаллида Ti_3Al после отжига образуются оксиды Ti_2O и TiO . Их концентрация увеличивается с ростом температуры нагрева. В интерметаллидных покрытиях с добавками карбида бора под действием термической обработки снижается содержание боридов TiB и TiB_2 , а концентрация оксида титана TiO повышается. Микротвёрдость полученных покрытий превышает в 2-3 раза микротвёрдость титановой подложки, при этом положительное влияние высокотемпературного нагрева в увеличении твёрдости характерно только для покрытия из $Ti_3Al+5\%B_4C$, микротвёрдость которого достигает около 20 ГПа. Стойкость интерметаллидных покрытий к износу при трении скольжения относительно стали Р6М5 на два порядка выше, чем у сплава $Ti6Al4V$ без покрытий. Отжиг Ti_3Al покрытия с 15 масс. % добавкой карбида бора при температуре 1100 °С повышает его износостойкость в 3,3 раза. Коэффициент трения всех покрытий после термической обработки уменьшился примерно на 10 – 15 %, однако коррозионная стойкость покрытий на основе интерметаллида Ti_3Al с добавками карбида бора снижается.



ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование жаростойкости и кинетики изменения элементного состава композиции из титанового сплава ВТ4-1 с жаростойкими покрытиями / Д. А. Александров, С. А. Мубояджян, А. М. Гаямов, Д. С. Горлов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2014. – № 5. – С. 61-66.
2. Горынин, И. В. Титан в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. – М: Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Имаев, В. М. Современное состояние исследований и перспективы развития технологий интерметаллидных γ -TiAl сплавов / В. М. Имаев, Р. М. Имаев, Т. И. Оленева // *Письма о материалах*. – 2011. – Т.1. – № 1. – С.25-31.
4. Формирование термически стабильной структуры в титановом сплаве с повышенным содержанием алюминия при термоводородной обработке / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, О. Н. Гвоздева, В. А. Пожого // *Титан*. – 2012. – № 2(36). – С. 4-10.
5. Пячин, С. А. Формирование и исследование электроискровых покрытий на основе алюминидов титана / С. А. Пячин, А. А. Бурков, В. С. Комарова // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2013. – Вып. 6. – С. 16-24.
6. Влияние добавок оксидов и карбидов металлов на свойства интерметаллидных Ti_3Al электроискровых покрытий / С. А. Пячин, А. А. Бурков, Н. М. Власова, Е. А. Кириченко // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2016. – Т. 13. – № 2. – С. 168-173.
7. Износостойкость и жаростойкость электроискровых покрытий на основе Ti_3Al с добавкой карбида бора // С. А. Пячин, А. А. Бурков, Н. М. Власова, Е. А. Кириченко, Б. Я. Мокрицкий, Е. Р. Зайкова // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике*. – 2017. – № I-1(29). – С. 49-55.
8. Семенова, И. П. Наноструктурные титановые сплавы: новые разработки и перспективы применения / И. П. Семенова, Г. И. Рааб, Р. З. Валиев // *Российские нанотехнологии*. – 2014. – Т. 9. – № 5-6. – С. 84-95.
9. Anandan, C. Effect of PostNitride Annealing on Wear and Corrosion Behavior of Titanium Alloy Ti-6Al-4V / C. Anandan, L. Mohan // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2016. – Vol. 25. – P. 4416-4424.
10. Effect of the content of B_4C on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings fabricated on Ti6Al4V / L. L. Bai, J. Li, J. L. Chen, J. Z. Shao, C. C. Qu // *Optics and Laser Technology*. – 2016. – Vol. 76. – P. 33-45.
11. Jin, J. The influence of plasma nitriding on microstructure and properties of CrN and CrNiN coatings on Ti6Al4V by magnetron sputtering / J. Jin, H. Duan, X. Li // *Vacuum*. – 2017. – Vol. 136. – P. 112-120.
12. Effects of annealing on tensile property and corrosion behavior of Ti-Al-Zr alloy / Tae-Kyu Kim, Byung-Seon Choi, Yong-Hwan Jeong, Doo-Jeong Lee, Moon-Hee Chang // *Journal of Nuclear Materials*. – 2002. – Vol. 301. – P. 81-89.
13. Influence of ion implantation on nanoscale intermetallic – phase formation in Ti-Al, Ni-Al and Ni-Ti systems / I. A. Kurzina, E. V. Kozlov, Yu. P. Sharkeev, A. I. Ryabchikov, I. B. Stepanov, I. A. Bozhko, M. P. Kalashnikov, D. O. Sivin, S. V. Fortuna // *Surf. Coat. Technology*. – 2007. – Vol. 201. – P. 8463-8468.
14. Leyens, C. Intermetallic Ti-Al coatings for protection of titanium alloys: oxidation and mechanical behavior / C. Leyens, M. Peters, W. A. Kaysser // *Surface and Coatings Technology*. – 1997. – Vol. 94-95. – P. 34.
15. Microstructure and properties of TiB_2 -TiB reinforced titanium matrix composite coating by laser cladding / Y. Lin, J. Yao, Y. Lei, H. Fu, L. Wang // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2016. – Vol. 86. – P. 216-227.
16. Microstructure and high temperature oxidation resistance of in-situ synthesized TiN/ Ti_3Al intermetallic composite coatings on Ti6Al4V alloy by laser cladding process / H. Liu, X. Zhang, Y. Jiang, R. Zhou // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 670. – P. 268-274.
17. High-temperature wear and oxidation behaviors of TiNi/Ti2Ni matrix composite coatings with TaC addition prepared on Ti6Al4V by laser cladding / Y. H. Lv, J. Li, Y. F. Tao, L. F. Hu // *Applied Surface Science*. – 2017. – Vol. 402. – P. 478-494.
18. Influence of SiC-Ti/Al on the Microstructural and Mechanical Properties of Deposited Ti-6V-4Al Alloy with Cold Spray Technique / K. E. Machethe, A. P. I. Popoola, D. I. Adebisi, O. S. I. Fayomi // *Procedia Manufacturing*. – 2017. – Vol. 7. – P. 549-555.
19. PalDey, S. Cathodic arc deposited thin film coatings based on TiAl intermetallics / S. PalDey, S. C. Deevi, T. L. Alford // *Intermetallics*. – 2004. – Vol. 12. – Iss. 7-9. – P. 985-999.
20. Fretting Fatigue in Aircraft Components Made of Ti-Al-V Alloys / M. Sujata, M. Madan, K. Raghavendra, S. K. Bhaumik // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 55. – P. 481-486.
21. Antimicrobial property, cytocompatibility and corrosion resistance of Zn-doped ZrO_2/TiO_2 coatings on Ti6Al4V implants / R. Wang, X. He, Y. Gao, X. Yao, B. Tang // *Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 75. – P. 7-15.

Проценко А. Е., Малышева Д. П., Петров В. В., Шпилев А. М.

A. E. Protsenko, D. P. Malysheva, V. V. Petrov, A. M. Shpilev

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЭНДВИЧ-КОНСТРУКЦИЙ

STUDY OF THE EFFECT OF THERMAL TREATMENT ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SANDWICH STRUCTURES

Проценко Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии переработки нефти и полимеров Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: protsenko.ae@yandex.ru.

Mr. Alexander E. Protsenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Technology of oil and polymer processing, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: protsenko.ae@yandex.ru.

Малышева Дарья Павловна – аспирант кафедры технологии самолётостроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: daryareshet@mail.ru.

Ms. Daria P. Malysheva – a post-graduate student, Department of airplane technology, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: daryareshet@mail.ru.

Петров Виктор Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии переработки нефти и полимеров Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: petrovpng@mail.ru.

Mr. Victor V. Petrov – Dr.hab. of Engineering, Professor, Department of Technology of oil and polymer processing, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: petrovpng@mail.ru.

Шпилев Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

Mr. Anatoly M. Shpilev – Dr.hab. of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

Аннотация. В статье представлены данные экспериментального исследования влияния термической обработки на физико-механические свойства сэндвич-конструкций. Сэндвич-конструкции были получены с использованием метода VaRTM. Термическая обработка проводилась при значениях температуры, равных 80 °С и 60 °С при различном времени выдержки. Были проведены испытания разрушающего контроля сэндвич-конструкций и стеклопластиков. Полученные данные коррелируют с результатами исследований степени набухания отверждённых связующих. Исследования структуры стеклопластиков показывают, что при термообработке происходит трансформация надмолекулярной структуры полимерной матрицы.

Summary. The article presents the data of an experimental study heat treatment influence on the physical and mechanical properties of cured samples of sandwich structures. The sandwich structures were made using VaRTM method. Heat treatment at 80 °C and 60 °C leads to increase in the bending strength. The tests of destructive control of sandwich structures and fiberglass plastics have been carried out. The SEM micrographs of the microstructures of fiberglass reinforced plastic samples show that during heat treatment there is a structural refinement of the polymer matrix. The results correlate with the data of swelling of the cured binder.

Ключевые слова: сэндвич-конструкции, полимерный композиционный материал, прочность, набухание, сканирующая электронная микроскопия, эпоксивинилэфирное связующее, термическая обработка.

Key words: sandwich structures, polymer composite material, strength, swelling, scanning electron microscopy, epoxy vinyl ester binder, heat treatment.

УДК 678.5.046

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе термореактивных связующих широко используются в различных отраслях. Это связано с их низкой плотностью по сравнению с металлами, высокой прочностью в направлении армирования, высокой коррозионной стойкостью, а также низкими эксплуатационными расходами этих конструкций и изделий из таких материалов.

Около 80 % современных пассажирских самолётов выполнены из трёхслойных сотовых панелей из-за их относительно высокой удельной прочности и жёсткости по сравнению с традиционными монолитными конструкциями. Технология изготовления ускоренного формования сэндвич-панелей сочетает в себе преимущества вакуума и прессования [1].

Сэндвич-конструкции широко используются в судостроительной промышленности. В авиаконструкциях эти материалы позволяют уменьшить вес конструкций, а также увеличить плавучесть [3, 4].

В публикациях [5; 6] рассматривается инженерная технология конструкций из полимерных композиционных материалов, которые успешно применяются при строительстве современных судов.

При изготовлении крупногабаритных конструкций из панелей среднего слоя наиболее оптимальными являются безавтоклавные методы – вакуумная инфузия (VaRTM) для изделий нестандартной конфигурации и малой серии и инъекционный метод низкого давления (light-RTM) для типовых изделий [2]. Важную роль при использовании этих методов играют технологические параметры: время жизни связующего, температура окружающей среды, время выдержки под вакуумом, а также время и температура постотверждения.

Методика исследования

Исследование проводилось на панелях среднего слоя, представляющих гофрированный элемент, образованный пенопластовыми вкладышами (см. рис.1). Гофрированный элемент выполнен из стеклопластика на основе трёх слоёв полотняной ткани Ст-62004 (ХКК Композит) с нулевым углом армирования и эпоксивинилэфирного не предускоренного связующего Dion 9300 FR (Reich Hold). Формообразующие вкладыши изготавливались из поливинилхлоридного пенопласта Divinycell H35 высотой 40 мм.

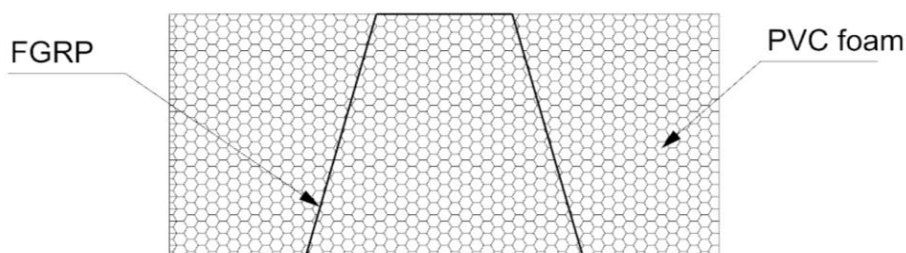


Рис. 1. Образец среднего слоя

Все образцы получали методом вакуумной инфузии. Связующее изготавливалось из четырёх компонентов по рецептуре: Dion 9300 FR – 100 масс. ч., Accelerator NORPOL 9802 – 3 масс. ч., Peroxide NORPOL № 11 – 2 масс. ч., Inhibitor NORPOL 9854 – 0,01 масс. ч. Время жизни смеси при нормальных условиях составляет 120 – 150 минут.

Отверждение стеклопластика проводилось в вакууме (0,01 МПа) при комнатной температуре в течение 6 часов. Выдержка изделия при комнатной температуре с целью достижения полной

полимеризации образцов проводилась в течение 10 дней. В дальнейшем образцы подвергались термической обработке при 60 °С в течение 5, 10, 15 часов и при 80 °С в течение 4, 8, 12 часов.

Для исследования структуры эпоксивинилэфирных связующих методом набухания использовались отверждённые образцы толщиной 10 мм и 10 мм в диаметре.

Начальную массу (m_0) определяли на аналитических весах. Один образец использовали как контрольный, а другие образцы подвергали термообработке в сушильном шкафу при 80 °С.

По завершении термообработки все образцы погружали в растворитель, состоящий из ацетона 33 %, циклогексанона 33 % и толуола 34 %. Через 24 часа образцы вынимали, остаточный растворитель удаляли фильтровальной бумагой, после чего их взвешивали для определения массы набухшего образца (m). Измерения продолжались до тех пор, пока масса не перестала изменяться.

Степень набухания (α) для каждого образца рассчитывается согласно формуле

$$\alpha = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100 \%,$$

где α – степень набухания; m – масса набухшего образца; m_0 – начальная масса.

Механические испытания проводились на испытательной машине INSTRON 3382, твёрдость исследовалась по методу Бринелля на приборе TIME Group Inc. TH600.

Результаты исследования

Из полученных экспериментальных данных следует, что термическая обработка приводит к увеличению несущей способности сэндвич-конструкций (см. рис. 2). При термообработке образцов при температуре 60 °С нагрузка, приводящая к разрушению образца, линейно возрастает на 14 % при пятичасовой выдержке и повышается на 27 % при пятнадцатичасовой. Термообработка при 80 °С в течение 4 часов способствует резкому увеличению несущей нагрузки сэндвич-конструкции на 30,7 %, дальнейшая обработка при этой температуре приводит к незначительному увеличению предела прочности – на 34,8 %.

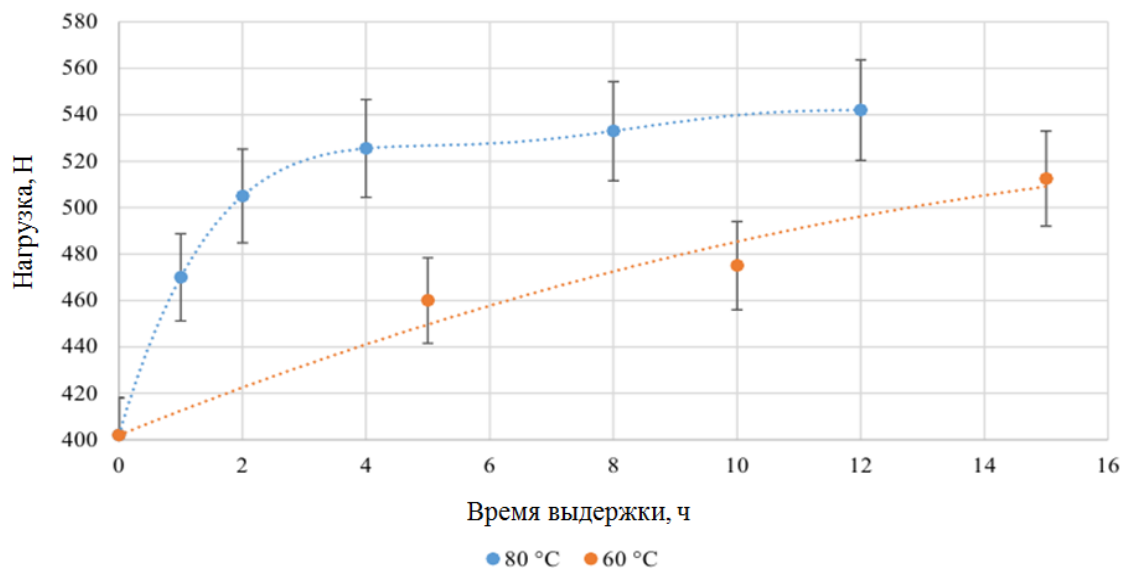


Рис. 2. Зависимость предельной нагрузки от времени и температуры выдержки

По данным визуального контроля излома образцов (см. рис. 3) следует, что образцы без термообработки при трёхточечном изгибе разрушаются по краю адгезионного слоя пенопласт-стеклопластик, что свидетельствует о недостаточной прочности клеевого соединения на границе между пенопластовым наполнителем и стеклотканью гофрированного слоя. Разрушение термообработанных образцов происходит по пенопластовому наполнителю. Это показывает, что при тер-

мообработке происходит упрочнение клеевого слоя за счёт протекания окончательного отверждения эпоксивинилэфирного связующего при повышенных температурах.

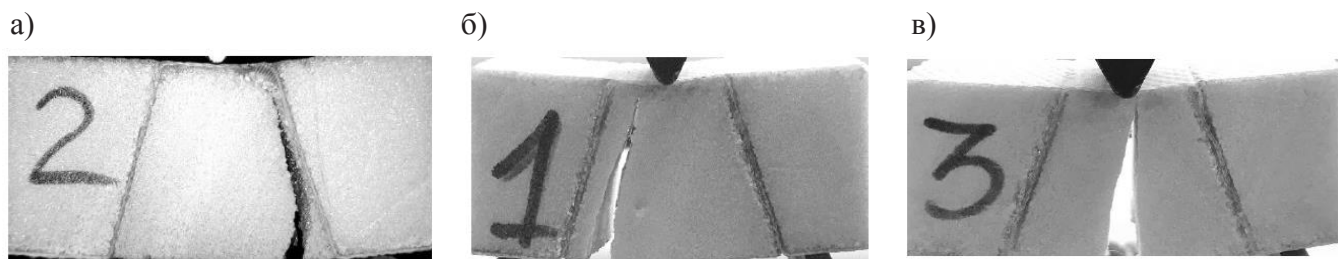


Рис. 3. Фотографии испытанных образцов при разном времени экспозиции:
 а – без термообработки; при термообработке (80 °С):
 б – при 2-часовой выдержке; в – при 4-часовой выдержке

В то же время были проведены испытания стеклопластиков, полученных вакуум-инфузионным методом, что и сэндвич-конструкции. Данные механических испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические испытания стеклопластиков

Образец	Твёрдость, НВ	Изгиб, σ_b [МПа]	Предел прочности, σ_t [МПа]
Стеклопластик	44,6	487,9	467,9
Термообработанный стеклопластик	48,1	831,9	831,9

Таким образом, результаты проведённых испытаний показывают, что термообработка стеклопластика приводит к значительному увеличению его механических характеристик.

Представленные данные были также подтверждены исследованием набухания термообработанных образцов (см. рис 4).

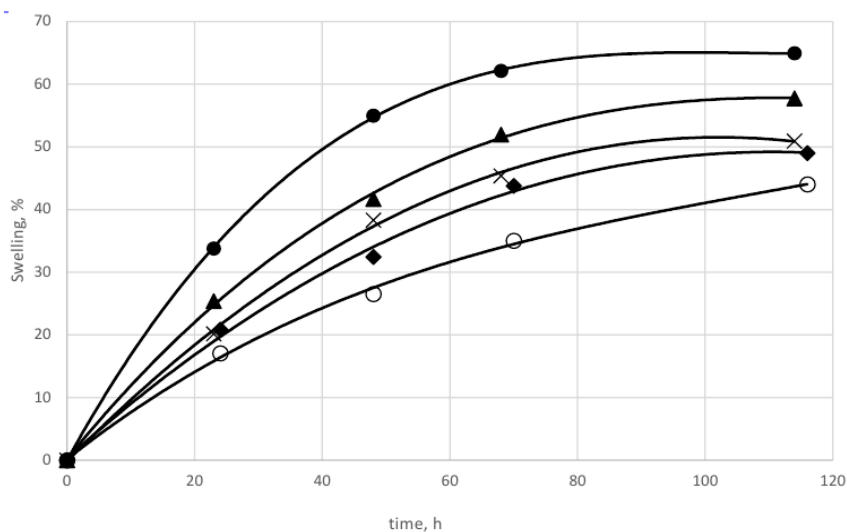


Рис. 4. Влияние термообработки на набухание

В результате термообработки степень набухания уменьшается на 7 %, а при 4-часовой выдержке этот параметр уменьшается на 14 %. Восьмичасовая и двенадцатичасовая выдержка для образцов приводит к снижению набухания на 16 % и 21 % соответственно. Полученные данные указывают на процесс постотверждения, протекающий при высокой температуре и приводящий к увеличению количества поперечных связей в полимере. Это препятствует проникновению молекул растворителя внутри трёхмерной решётчатой структуры отверждённой макромолекулы.

Фрактограммы образцов стеклопластика, представленные на рис. 5, показывают, что в процессе термической обработки происходит измельчение структуры полимерной матрицы, приводящее к закономерному уменьшению толщины ламелей вследствие протекания процессов сшивки при выдержке полимеров в условиях повышенной температуры.

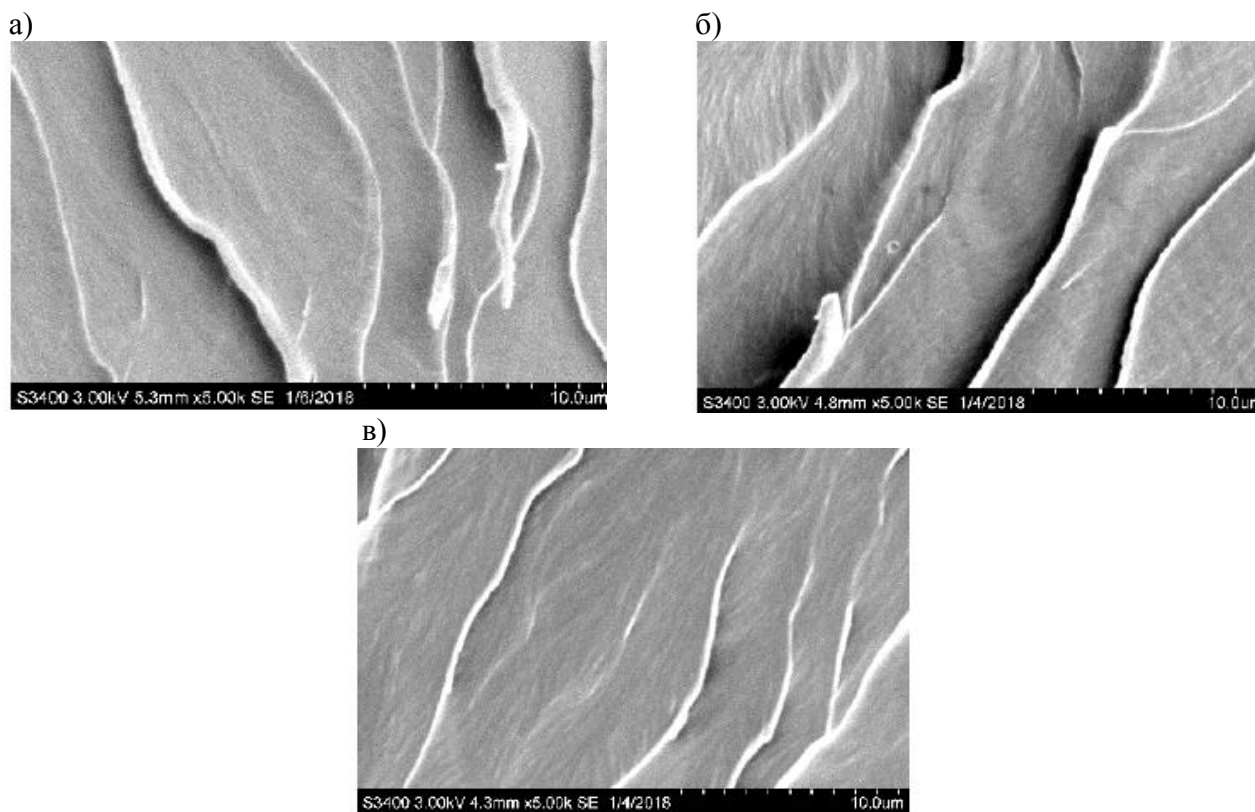


Рис. 5. Структура стеклопластиков:

а – без термообработки; при термообработке (80 °С): б – при 4-часовой выдержке; в – при 8-часовой выдержке

Заключение

1. Термообработка ПКМ является обязательной технологической операцией, обеспечивающей повышение прочности за счёт протекания процессов постотверждения эпоксивинилэфирного связующего. По данным экспериментальных исследований, оптимальной является обработка композиционного материала при температуре 80 °С в течение 4 часов. Максимальное напряжение при изгибе термообработанного стеклопластика увеличилось на 76 %, а максимальное напряжение при растяжении – на 78 %.

2. В процессе термической обработки ПКМ происходит измельчение структуры полимерной матрицы, приводящее к закономерному уменьшению толщины ламелей вследствие протекания процессов сшивки при выдержке полимеров в условиях повышенной температуры.

3. Степень набухания ПКМ закономерно снижается пропорционально времени термообработки, что также является следствием увеличения числа поперечных связей в полимерной матрице.



ЛИТЕРАТУРА

1. Технология ускоренного формования трёхслойных сотовых панелей интерьера самолёта / Е. А. Вешкин, В. И. Постнов, О. Б. Застрогина, Р. А. Сатдинов / Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 44.
2. Булкин, В. А. Применение перспективных композиционных материалов в надводном судостроении / В. А. Булкин, Н. Н. Федонюк, А. В. Шляхтенко. – Морской вестник. – 2013. – № 1. – С. 7-8.
3. Gullberg, O. Design and construction of GRP sandwich ship hulls. Marine Struct / O. Gullberg, K. A. Olsson. – 1990. – Vol. 3(2). – P. 93-109.
4. Karthikeyan, C. S. Investigation of bending modulus of fiber-reinforced syntactic foams for sandwich and structural applications. Polym. Adv. Tech / C. S. Karthikeyan, S. Sankaran. – 2007. – Vol. – 18(3). – P. 254-256.
5. Appolonov, E. M. Polymeric composite materials. Innovations in the industry, Innovations / E. M. Appolonov, N. N. Fedonyuk, V. M. Shaposhnikov. – 2013. – Vol. 181. – P. 18-20.
6. Mouritz, A. P. et al. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines. Comp. Struct / A. P. Mouritz. – 2001. – Vol. 53(1). – P. 21-42.

Сидоров А. И., Евстигнеев А. И.
A. I. Sidorov, A. I. Yevstigneyev

**ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ ЗА СЧЁТ ПРИЛИВОВ
И ОТЛИВОВ МОРЯ**

**ON ONE METHOD OF NATURAL WATER PURIFICATION AT THE EXPENSE
OF TIDES AND EBBS OF THE SEA**

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, советник при ректорате Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: diss@knastu.ru.

Mr. Alexey I. Yevstigneyev – Doctor of Engineering, Professor, university Administration Adviser for Research, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

Сидоров Алексей Иванович – научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (инженер) (Россия, Комсомольск-на-амуре). E-mail: natasi.79.79@mail.ru.

Mr. Alexey I. Sidorov – researcher of Komsomolsk-on-Amur State University (engineer) (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: natasi.79.79@mail.ru.

Аннотация. В статье представлен новый экономичный способ естественной очистки воды в прибрежной морской зоне с помощью энергии приливов и отливов; разработана конструкция опытной установки по реализации способа.

Summary. A new economical method of natural water purification in the coastal marine zone due to tidal energy has been introduced; the design of the pilot plant for the implementation of the method has been developed.

Ключевые слова: естественная очистка воды, аквапарки, прилив, отлив, прибрежная зона моря.

Key words: natural water purification, water parks, tide, reflux, coastal zone of the sea.

УДК 627.8.03

Одной из нерешённых проблем является проблема естественной очистки воды в аквапарках, бассейнах, спортивно-оздоровительных комплексах, расположенных на берегу моря и (или) в прибрежной зоне.

Известен способ очистки воды [1], при котором вода очищается путём принудительной подачи чистой воды в нижнюю часть чаши и естественного слива загрязнённой воды из верхней части чаши. Эта операция выполняется посредством узла ввода, состоящего из блока забора воды, насосной станции с электронасосами, трубопровода с задвижкой подачи воды в чашу и выходной системы подачи чистой воды, расположенной на дне или по периметру дна чаши. Операция способа естественного слива верхних загрязнённых слоёв воды из чаши, выполняемая благодаря её расположению выше уровня моря, реализуется посредством узла вывода, состоящего из системы сбора верхних слоёв воды и трубопровода с задвижкой слива верхних слоёв воды. Такая система может быть выполнена, например, в виде переливной кромки по периметру верхней части чаши. Этот высокоэффективный способ нашёл широкое применение в аквапарках, бассейнах, спортивно-оздоровительных комплексах. Но это сопровождается большими затратами на электроэнергию, связанными с принудительной подачей больших объёмов воды электронасосами.

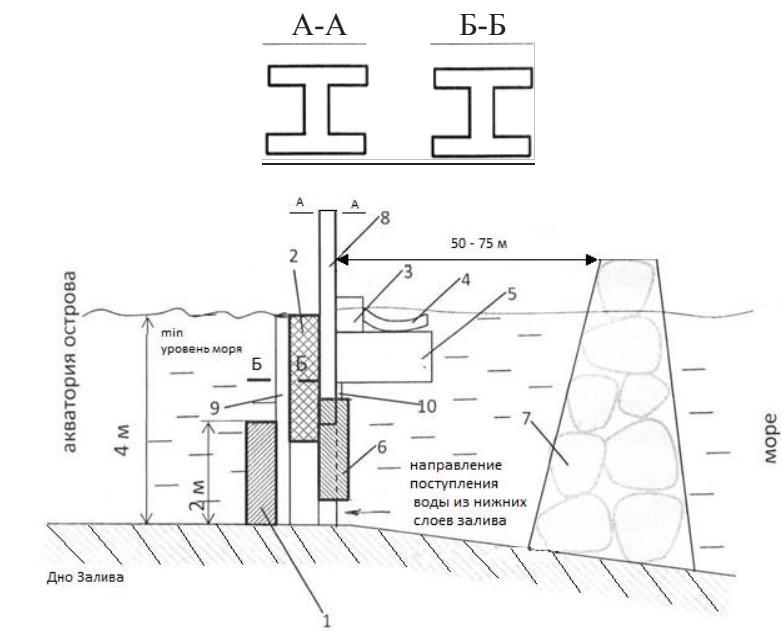
Известен способ очистки воды [2], включающий в себя две операции: принудительную подачу чистой воды в нижние слои чаши и естественный слив верхних загрязнённых слоёв воды из чаши. Операция принудительной подачи воды выполняется посредством узла ввода, в состав которого входит блок забора воды, насосная станция с электронасосами, трубопровод с задвижкой подачи воды в чашу и выходная система подачи чистой воды, расположенная на дне или по периметру дна чаши. Операция естественного слива верхних загрязнённых слоёв воды из чаши выполняется посредством узла вывода, в состав которого входит система сбора верхних слоёв воды

и трубопровод с задвижкой слива верхних слоёв воды. В целом этот способ приобретает искусственный (принудительный) характер очистки воды и требует значительных затрат на электроэнергию в связи с подачей больших объёмов воды электронасосами, на проектирование и установку для каждого объекта специальной системы подачи воды, учитывающей гидродинамические ударные нагрузки при пуске электронасосов.

Задачей нового решения [3] является упрощение системы подачи воды и снижение эксплуатационных затрат вследствие использования приливов и отливов моря для естественной очистки воды. Решение задачи заключается в упрощении системы подачи воды и устранении затрат на электроэнергию благодаря замене искусственной подачи и очистки воды посредством насосной станции на естественную за счёт приливов и отливов моря.

Упрощение системы подачи воды достигается не только из-за высвобождения дорогостоящей насосной станции с электронасосами, но и вследствие устранения гидродинамических ударных нагрузок при пуске электронасосов. Статические плавно меняющиеся безударные нагрузки приливов позволяют вместо металлических конструкций в системе подачи морской воды применить некоррозийные пластмассовые. Так как верхний уровень воды в чаше не выше уровня моря после прилива, а узел вывода воды расположен ниже уровня воды в чаше, трубопровод узла ввода воды с блоком забора воды с нижних слоёв моря укладывается по дну моря на достаточно удалённом расстоянии от берега, например, 200 метров и более в зависимости от экологического состояния моря, благодаря чему и решается эта задача. Дополнительный результат достигается за счёт того, что при работе аквапарков, бассейнов, спортивно-оздоровительных комплексов круглосуточное обновление (очистка) воды производится утром на предзавершающей стадии прилива, когда уровень воды в чаше выше уровня моря. Предлагаемый авторами способ [3] включает в себя две операции: ежедневный естественный слив верхних загрязнённых слоёв воды из чаши во время морского отлива и естественное пополнение чаши чистой водой во время морского прилива. Операция естественного слива верхних загрязнённых слоёв воды из чаши во время морского отлива выполняется посредством узла вывода, состоящего из блока забора воды, трубопровода с задвижкой подачи воды в чашу и выходной системы подачи чистой воды, расположенной на дне чаши.

Этот способ отражён на рис. 1.



- 1 – кассетный джутовый фильтр; 2 – защитная стенка; 3 – верхняя шиберная затворка;
4 – конвейерная сетка; 5 – понтон; 6 – нижняя шиберная затворка; 7 – волнолом;
8 – направляющая понтона и нижней заслонки; 9 – направляющая для монтажа фильтра;
10 – соединение понтона с нижней шиберной заслонкой

Рис. 1. Схема конструкции по очистке воды за счёт морских приливов и отливов

Каждые сутки ночью или рано утром во время морского отлива открывают задвижку слива верхних слоёв воды через трубопровод узла вывода. После частичного слива воды из чаши задвижку слива верхних слоёв воды закрывают и затем на период прилива моря (или на весь день до начала отлива) открывают задвижку подачи воды в чашу через узел ввода, состоящего из блока забора чистой воды с нижних слоёв моря, трубопровода и выходной системы подачи чистой воды, расположенной на дне чаши или по периметру дна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 2424200, МПК ЕОЗВ 1/00, Е02В 15/00, В01Д 35/06, С02F 1/36, F25D 2/00. Система очистки и обеззараживания воды в плавательных бассейнах / Боев В. Ф., Улановский Я. Б., Рудых Г. С.; патентообладатель ООО «Стройинжиниринг СМ» (RU). – № 2009129257/05; заявл. 30.07.2009; опубл. 20.07.2011. Бюл. № 20.
2. Патент РФ №79582, МПК ЕОЗВ 1/00, Е02В 15/00, В01Д 35/06, С02F 1/36, F25D 2/00. Технический водный комплекс / Плугин А. И., Манюк Е. Л., Крылов Н. Н.; патентообладатель Плугин А. И. – № 2008137576/22; заявл. 19.09.2008; опубл. 10.01.2009. Бюл. № 1.
3. Патент № 2547929, МПК Е 02В 15/00, ЕОЗВ 1/00. Способ естественной очистки воды за счёт приливов и отливов моря в аквапарках, бассейнах, спортивно-оздоровительных комплексах, расположенных на берегу и (или) в прибрежной зоне / А. И. Сидоров, А. И. Евстигнеев, В. С. Климаш. – № 2013153429; заявл. 02.12.2013; опубл. 10.04.2015.



Чернышов Е. А., Романов И. Д., Романов А. Д., Горбатов Р. О.
E. A. Chernyshov, I. D. Romanov, A. D. Romanov, R. O. Gorbатов

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ШЛЕМОВ

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND TECHNOLOGIES OF TEST OF BALLISTIC HELMETS.

Чернышов Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева (Россия, Нижний Новгород); 603950, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24/1; тел.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Mr. Evgeny A. Chernyshov – Doctor of Engineering, professor of Nizhny Novgorod State Technical University of R. E. Alekseev (Russia, Nizhny Novgorod); 603950, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod, 24/1 Minin str.; tel.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Романов Иван Дмитриевич – инженер Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева (Россия, Нижний Новгород); 603950, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24/1; тел.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Mr. Ivan D. Romanov – engineer of Nizhny Novgorod State Technical University of R. E. Alekseev (Russia, Nizhny Novgorod); 603950, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod, 24/1 Minin str.; tel.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Романов Алексей Дмитриевич – инженер Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева (Россия, Нижний Новгород); 603950, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24/1; тел.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Mr. Alexey D. Romanov – engineer of Nizhny Novgorod State Technical University of R. E. Alekseev (Russia, Nizhny Novgorod); 603950, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod, 24/1 Minin str.; tel.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Горбатов Роман Олегович – кандидат медицинских наук, доцент кафедры травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии имени М. В. Колокольцева, руководитель лаборатории аддитивных технологий Университетской клиники Приволжского исследовательского медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации (Россия, Нижний Новгород); 603155, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, Верхне-Волжская набережная, 18; тел.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Mr. Roman O. Gorbатов – associate professor of traumatology, orthopedics and VPH of M. V. Kolokoltsev, head of the additive technologies laboratory of the University clinic of the Privolzhsky Research Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Russia, Nizhny Novgorod); 603155, Nizhny Novgorod region, Nizhny Novgorod, 18 Upper Volga embankment; tel.: + 7 (831) 436-03-02. E-mail: nil_st@nntu.ru.

Аннотация. В зависимости от интенсивности боевых действий распределения средств поражения на поле боя меняется, в том числе в разные периоды одного конфликта. В достаточно длительных военных конфликтах с массовым применением артиллерии и авиации осколочные ранения преобладают. При этом среди раненых основные потери составляют ранения в конечности, а пулевые ранения в голову вносят основной «вклад» в строку «убитые», причём с учётом действия снайперов вероятность таких ранений только увеличивается. В настоящее время баллистические шлемы могут остановить осколки и пули пистолета, но повреждения и черепа, и мозга происходят. Так, если пуля имеет достаточно кинетической энергии, она способна сильно деформировать шлем, вследствие чего одной из актуальных проблем является создание испытательного стенда с возможностью тестирования защитных характеристик шлемов с учётом особенностей строения костей черепа, головного мозга, подвижности шеи. С точки зрения механики, голова человека представляет собой деформируемую упругую оболочку, заполненную вязкоупругой средой. Причём имеются зоны пониженной прочности, при травмировании которых увеличивается риск повреждения головного мозга. Целью данной работы является обзор методик проведения испытаний и определения травм головного мозга при использовании шлемов баллистической защиты.

Summary. Depending on intensity of fighting of distribution of weapons of destruction in the battlefield changes, including at different times one conflict. In rather long military conflicts with mass application of artillery and aircraft missile wounds prevail. At the same time among wounded the main losses it is wounds in an extremity, and bullet wounds in the head, the killed make main «contribution» to a line. And, taking into account action of snipers,

the probability of such wounds only increases. Now ballistic helmets can stop splinters and bullets of a gun, but nevertheless, damage and a skull and a brain occur. So if at a bullet is rather kinetic energy, it can make big deformation of a helmet. Owing to what one of current problems is creation of the test stand with a possibility of testing of protective characteristics of helmets taking into account features of a structure of bones of a skull, brain, mobility of a neck. From the point of view of mechanics the head of the person represents the deformable elastic cover filled with the viscoelastic environment. And there are zones of the lowered durability when which traumatizing, the risk of injury of a brain increases. The purpose of carrying out work is the overview of techniques of carrying out tests and definition of injuries of a brain when using helmets of ballistic protection.

Ключевые слова: баллистическая защита, шлем, каска, пробитие, кость, травма головного мозга.

Key words: ballistic protection, helmet, the break, bone, brain injury.

УДК 623.4-05:61

Существуют различные варианты оценки потерь и оценки эффективности применения элементов баллистической защиты [7]. При этом практически нет статистики попадания в бронезилов пробивающих элементов, которые не пробиты его [6], и фактически эффективность бронезилов некоторые авторы оценивают по снижению потерь вследствие ранений в область, прикрытую бронезиловыми элементами. Причём для оценки используются различные данные, например в работах [17; 4; 18] показано значительное расхождение данных о ранениях в разных источниках, в том числе в разное время действия одного конфликта. Например, в ходе наступательной фазы операции «Иракская свобода 1» чаще наблюдались ранения от стрелкового оружия, тогда как в оккупационную фазу преобладали осколочные ранения вследствие применения самодельных взрывных устройств. Распределение средств поражения американских войск в Афганистане и Ираке по частоте применения и пробивающей способности показано в работе [20]. В работе [8] показана структура санитарных потерь хирургического профиля по локализации применительно к СССР/РФ. В [5] приводят отечественные данные распределения средств поражения на поле боя: осколки – более 60 %, высокоскоростные пули калибра до 7,62 мм – до 25 %, низкоскоростные пули калибра 7,62...9,0 мм – до 5 %. В частности, во время Великой Отечественной войны в Красной Армии осколочные ранения составляли 57 %, в армии США во время войн в Корее и Вьетнаме – от 73 до 84 %, то есть в достаточно длительных военных конфликтах с массовым применением артиллерии и авиации такие ранения являются определяющими. Однако среди раненых основные потери при ранении в конечности составляют 52...70 %, а пулевые ранения в голову вносят основной «вклад» в строку «убитые», причём с учётом действия снайперов вероятность таких ранений только увеличивается [3]. В частности, в работе [2, 136] указано, что при 41,6 % раненых в голову умерли на поле боя и 37,2 % умерли на этапах эвакуации. В ходе конфликта «Буря в пустыне» травма головного мозга была отмечена в 66 % смертельных случаев и у 49 % были травмы черепа, которые могли быть связаны с ранами, указывающими на воздействия с твёрдой поверхностью или объектом. Остающиеся 17 % травм головного мозга не показали переломов черепа, предполагающих, что они были вызваны инерционной акселерацией мозга.

Первый в мире тканево-полимерный шлем появился в США в начале 1980-х годов. Он был принят на вооружение сухопутных войск под названием Personnel Armor System, Ground Troops (PASGT) и был выполнен из ткани на основе волокна Kevlar®29 и связующего. Уровень противоосколочной стойкости шлема определялся стандартом MIL-STD-662 F «Определение противоосколочной стойкости (ПОС) по STANAG 2920 (ВСТ от 01.301.003-2015), полицейским NIJ 0106.01 «Программа оценки технологий. Стандарт NIJ для баллистических шлемов» и составлял $V 50 \% = 600$ м/с по стандартному осколку STANAG 2920, что примерно соответствует уровню $V 50 \% = 570...580$ м/с по стальному шариком массой 1,03 г. Противоударные характеристики регламентированы стандартом MIL-H44099A (ряд стандартных параметров для лабораторных испытаний военного стандарта США (United States Military Standard)).

В настоящее время в основном используются шлемы, обеспечивающие защиту от пулевых пуль на уровне 1-го класса по ГОСТ Р 50744-95 «Бронеодежда. Классификация и общие технические требования» или 2-го класса по стандарту США NIJ Std-0106.01 «Программа оценки технологий. Стандарт NIJ для баллистических шлемов». Композиционные шлемы, изготовленные

с применением арамидных тканей или сверхвысокомолекулярного полиэтилена, обладают существенным преимуществом по сравнению с ранее производимыми шлемами из металлических материалов. Так, при одинаковой массе, равной 1,5 кг, полимерные шлемы обеспечивают противосколочную стойкость, определяемую баллистическим пределом V 50 – скоростью 50 % непробития, равной 600...680 м/с. Создать защиту с более высокой стойкостью только за счёт увеличения толщины корпуса шлема, что, возможно, приводит к существенному увеличению носимой на голове массы. При этом опытно-экспериментальным путём медиками была определена возможность получения тяжёлой травмы шейного участка позвоночника человеком при превышении носимой распределённой массы на голове сверх 1600 г [10].

Шлемы для спецподразделений силовых структур могут иметь значительно бóльшую массу и обеспечивать защиту от более мощных боеприпасов. Акционерное общество «НИИ стали» разработало и изготовило опытный комбинированный шлем с лицевым керамическим слоем из карбида бора и основой из органокомпозита с титановым подслоем для снижения контузионной травмы головы. Этот комбинированный шлем массой 7,5 кг, площадью защиты 18 дм² был испытан по ба классу по ГОСТ Р 50744-95 «Бронеодежда. Классификация и общие технические требования» [12]. Для снижения воздействия на шейные позвонки при ударе в шлем и приведения эксплуатационных характеристик была внедрена система разгрузки с передачей усилия на плечевую область.

В настоящее время баллистические шлемы могут остановить осколки и пули пистолета, тем не менее повреждения и черепа и мозга происходят. Например, если пуля имеет достаточно кинетической энергии, она может произвести большую деформацию шлема. Эта деформация может вызвать контакт между внутренней частью выпучины шлема и черепом. На рис 1–8 приведены примеры различных устройств для испытаний шлемов.

В ряде случаев при испытании шлемов используется устройство, показанное на рис 1., при этом для установления факта пробития исследуется пластина, вставленная в устройство. В некоторых случаях принято считать запреградное воздействие безопасным только при полном отсутствии касания шлемом имитатора головы, в других случаях измеряют тыльную выпучину или отпечаток в баллистической глине (см. рис 2).

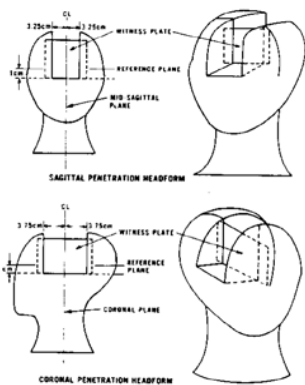


Рис. 1. Схема расположения тестовых пластин NIJ Standard for Ballistic Helmets Supersedes NILECJ-STD-0106.00



Рис. 2. Имитатор головы АТС (Aberdeen Test Center), не заполненный пластилином

По зарубежному опыту, стандартом НАТО NIJ 0106.01 «Программа оценки технологий. Стандарт NIJ для баллистических шлемов» допускается касание тыльной поверхности шлема головы при ударе пули, но при этом обязательно измеряется ускорение в центре головы и оно не должно превышать 400g [23].

Методика оценки запреградной травмы по уровню давления в центре имитатора головы разработана достаточно давно (см. рис. 3–5). На сегодня она является одним из способов оценки качества армейских шлемов по запреградной травме.

В ряде случаев используются дополнительные процедуры оценки запреградной травмы, как например испытания на трупе. При этом оцениваются ушибленная рана и повреждения костей черепа и мозга.



Рис. 3. Баллистический имитатор головы БИГ-1

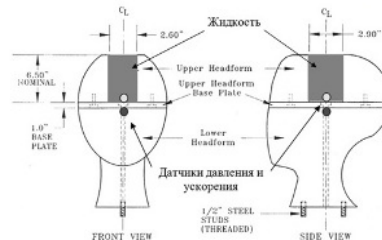


Рис. 4. Баллистический имитатор головы БИГ-2, патент № 148811

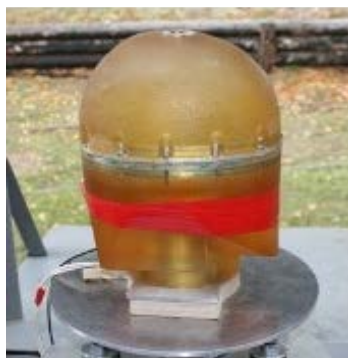


Рис. 5. Имитатор головы ООО «Специальная медицинская техника», Санкт-Петербург [13]

В работе [1] описана конструкция баллистического имитатора головы для оценки жизнедеятельности и безопасности человека при использовании шлемов, причём практический интерес представляет определение параметров процесса формирования закрытой черепно-мозговой травмы при непробитии шлема различными высокоскоростными поражающими элементами для оценки возможных последствий полученного повреждения (травмы).

В [15] приведена модель, предназначенная для оценки защитных свойств шлемов от воздействия высокоскоростных поражающих элементов и вторичных осколков, которая позволяет обеспечить возможность оценки величины динамического воздействия шлема на голову. Модель состоит из двух частей жёсткого основания и укреплённой на нём верхней съёмной части. Съёмная часть имеет форму половины эллипсоида и выполнена из пластичного материала, имеющего заданную энергоёмкость деформации единицы объёма.

Необходимо отметить, что дополнительная масса большего шлема увеличивает его инерцию, эффективно уменьшает ускорение и сокращает ударную нагрузку на шею. При этом ряд стандартов разработан, чтобы оценить защиту головы от низких энергетических воздействий, например PAS017:1995 «Riot Helmets for Police use»; NIJ 0104.02 «Riot Helmets and Face Shields»; BS6658:1985 «Protective Helmets for Vehicle Users»; ASTM:F910-86 «Standard Specification for Face Guards for Youth Baseball»; STANAG 2920 «The adoption of standards for ballistic protection levels and testing»; Ballistic Protection German VPAM & PTI и др. Эти стандарты оценивают травму, наносимую более длительное время по сравнению с попаданием пули или осколка. В частности, британские шлемы протестированы на баллистическую стойкость UK/SC/5449, кроме того, они проходят тест UK/SC/6108 и BS6658:1985. Однако есть большая разница в природе баллистического воздействия и воздействия при дорожном происшествии, например. При равной энергии соударения в дорожных происшествиях в основном есть значительные массы и низкие скорости соударе-

ния, тогда как в баллистических воздействиях – малые массы и высокие скорости. Изготовители шлемов испытывают их различными методами, поэтому в ряде случаев шлемы трудно сравнивать. Так, в некоторых случаях шлемы испытывают после предварительного погружения в воду на 2–4 часа; так же испытываются шлемы, наклоненные вперёд под определённым углом, например, 5° [26].

В работе [19] показано, что по мере того как вес шлема снижается, жёсткость уменьшается; кроме того, в ряде моделей шлемов предусмотрен «сухой слой армирующего материала», что также способствует увеличению «тыльной выпучины» при непробитии. Тем не менее компромисс большим прогибом тыльной поверхности при уменьшенном весе может привести к другим механизмам повреждений или травм, таких как «запреградная тупая травма». Для большинства шлемов есть ограниченное пространство, доступное для значительной деформации тыльной части грани или прогиба под баллистический удар без касания броней или амортизирующим материалом костей. В ряде случаев [24; 25] допускается отпечаток в баллистической глине размером не более 16,0 мм. При этом даже при отсутствии касания «тыльной выпучиной» костей черепа механизм запреградной травмы может существенно измениться.

В работе [11] показано, что при энергии рассредоточенного ударного воздействия свыше 14 Дж наблюдается сотрясение головного мозга, а при энергии свыше 50 Дж наблюдается разрушение костей свода черепа с ушибом головного мозга. Для оценки амортизационных свойств защитных шлемов разработаны различные стенды. Один из таких изображён на рис. 6.

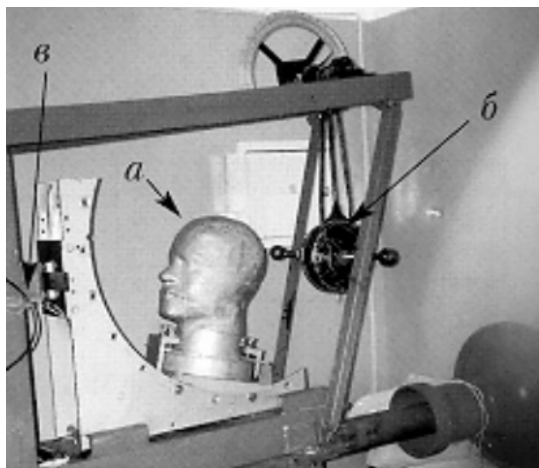


Рис. 6. Стенд для определения ударных нагрузок: а – макет головы; б – ударник маятникового копра; в – тензометрический датчик силы [14]

Основным критерием для оценки опасности получаемых человеком травм при подрыве броневедомоля было выбрано ускорение, действующее на голову манекена. Такой выбор обусловлен тем, что именно чрезмерные ускорения, действующие на головной мозг человека, приводят к тяжёлым последствиям, вплоть до летального исхода.

На основе функции ускорения головы человека в зависимости от времени построен широко используемый в настоящее время в автомобильной промышленности критерий НИС (Head Injury Criteria – критерий тяжести повреждений головы). В частности, по этому критерию оценивается пассивная безопасность автомобиля при столкновениях.

Для оценки результатов краш-тестов автомобилей применяется кривая Патрика (кривая Уэйн-Стейта), построенная в координатах «перегрузка – время». Поскольку при ударе форма диаграммы ударной перегрузки $n(t)$ в голове близка к треугольной, кривая Патрика может быть перестроена в координатах $\Delta V - \dot{n}$, где $\Delta V = g \int n dt$ – скорость, потерянная при ударе (то есть площадь диаграммы $n(t)$).

Соответствующий график изображён на рис. 7, где кривая соответствует случаю диаграммы $n(t)$ в форме равнобедренного треугольника.

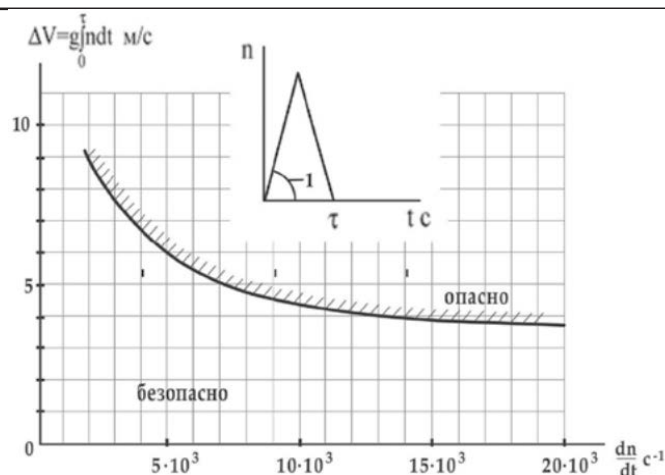


Рис. 7. Кривая Патрика в координатах $\Delta V - \dot{n}$.
Для ударного импульса в форме равнобедренного треугольника;
 \dot{n} , с-1 – темп (скорость) нарастания перегрузки в голове

Необходимо отметить, что работа [16] посвящена проблеме оценки травмобезопасности головы человека при ударе, вследствие которого может возникнуть черепно-мозговая травма. Отмечено, что методика подсчёта критерия НИС построена без учёта биомеханической структуры головы человека как многокомпонентной вязкоупругой системы и не соответствует общепринятым в механике и биомеханике методикам анализа задач подобного рода.

В работе [9] показано, что при подаче давления внутрь черепа деформации в центральной зоне основания черепа примерно в десять раз больше деформаций свода черепа, то есть основание черепа обладает существенно большей податливостью при нагрузках, чем свод. В статье приведены зависимости состояния в ближайшем последствии в зависимости от скорости соударения и направления удара (лбом, затылком, виском). При ударных нагрузках на голову по различным направлениям – в лоб, затылок, висок, сверху по темени – во всех случаях отмечались повреждения мозга в зоне базальных структур и основания черепа.

На рис. 8 и 9 видны два варианта характера разрушения костей черепа [21].

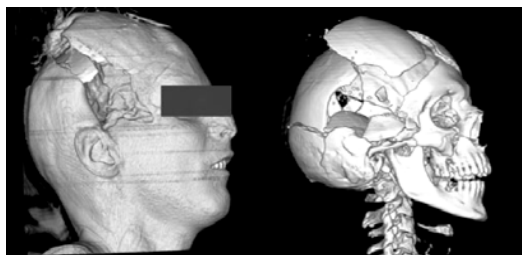


Рис. 8. Пример множественного разрушения
костей черепа

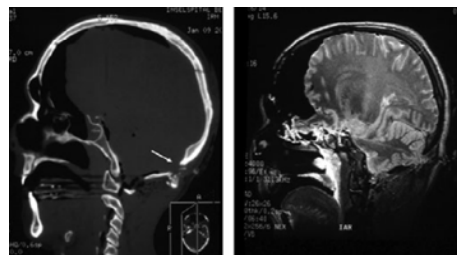


Рис. 9. Пример локального разрушения костей
черепа и повреждений головного мозга

На основании анализа проведённых исследований авторы [16] сформулировали следующие выводы: при ударных нагрузках (без переломов черепа), действовавших на голову в любом направлении – со стороны лба, затылка, виска, темени – повреждения мозга локализовались в области базальных структур; установлена патогенетическая связь повреждений базальных структур мозга с деформацией основания черепа, при этом в зависимости от формы ударного импульса значения деформаций и напряжений в вязкоупругой механической системе могут изменяться в 1,5–2 раза и более, что существенно влияет на оценку травмобезопасности ударного импульса при испытаниях.

В статье [22] показано, что практически не учитывается возможный наклон головы в момент соударения, однако наклонное влияние может генерировать вращательные силы голове, ко-

торая не появилась бы в чистом радиальном влиянии. Для вращательного ускорения комбинация пикового вращательного ускорения больше 10 рад/с^2 и пикового изменения во вращательной скорости больше 100 рад/с , что может причинить больше урона, чем прямое касание материала шлема и костей черепа.

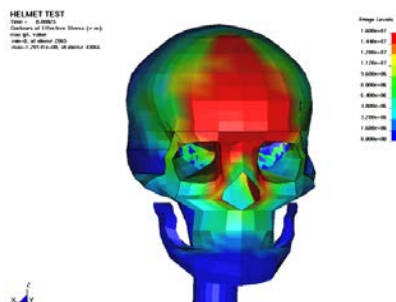


Рис. 10. Напряжение черепной кости во время радиального воздействия. Цвет показывает нагрузку от 0 МПа (синий цвет) к 144 МПа и выше (красный цвет)

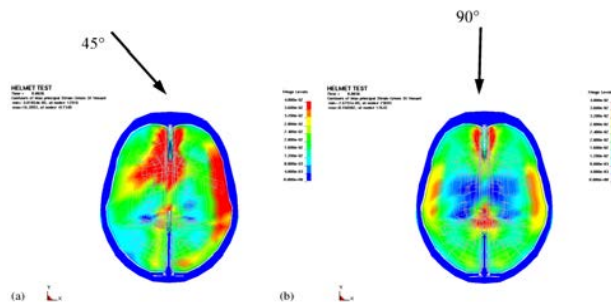


Рис. 11. Напряжение в мозговой ткани при попадании под углом 45° (слева) и 90° (справа). Цветом показан уровень нагрузок

В статье показано, что уровни напряжений и деформаций для головы в ряде случаев могут быть выше, если пуля попадёт под углом. Вращательная кинематика не входит в существующие стандарты. В работе показано моделирование непроникающих травматических повреждений головного мозга, вызванных в основном силами инерции. В этих воздействиях есть комбинации поступательного и вращательного движений, которые делают травмы трудно предсказуемыми.

Результаты распределения энергии ясно показывают разницу между ударами перпендикулярно поверхности и по касательной, что проиллюстрировано рис. 10–11. Видно, что при ударе под углом в мозге происходят значительно большие напряжения, чем при прямом ударе.

Результаты моделирования показывают, что в ряде случаев при условии непробития поражающие элементы, воздействующие на шлем под косым углом, могут приводить к большим повреждениям головного мозга, чем при попадании перпендикулярно поверхности. Например, удар под углом 45° вызвал самые высокие напряжения в ткани головного мозга.

При создании баллистических шлемов удаётся снизить их массу до 1 кг и менее, сохранив защитные характеристики. Однако отсутствие тыльной выпучины не гарантирует отсутствия повреждений головного мозга при попадании поражающего элемента под углом. Поэтому всё чаще применяются различные системы демпфирования удара и распределения динамических нагрузок на корпус. Современные методики испытаний по данным проведённого анализа литературы в большинстве случаев не позволяют корректно оценить уровень повреждений головного мозга в результате воздействия. Вследствие этого одной из актуальных проблем является создание испытательного стенда с возможностью тестирования защитных характеристик шлемов с учётом особенностей строения костей черепа, головного мозга, подвижности шеи.

С точки зрения механики голова человека представляет собой деформируемую упругую оболочку, заполненную вязкоупругой средой, причём имеются зоны пониженной прочности, при травмировании которых увеличивается риск повреждения головного мозга.

Аддитивные технологии 3D-печати анатомических структур человека с использованием данных компьютерно-томографического обследования позволяют создавать прецизионные макеты с учётом внешнего и внутреннего строения биологического объекта. Создание испытательного стенда на основе аддитивных технологий с учётом строения костей черепа позволит повысить достоверность проведения испытаний баллистической защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баллистический имитатор головы для определения защитных свойств шлемов / И. Е. Жуков, А. В. Миляев, Д. Ю. Ковалёв, А. А. Котосов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – № 3-4. – С 50-55.

2. Брюсов, П. Г. Дневник главного хирурга. Военно-полевая хирургия в локальном конфликте на Северном Кавказе / П. Г. Брюсов. – М.: Домашняя библиотека: ЗАО «Издательский дом Брюсова», 2013. – 184 с.
3. Булгаков, Н. П. Боевые огнестрельные ранения черепа и головного мозга высокоскоростными снарядами и стреловидными элементами: дис. ... д-ра мед. наук / Н. П. Булгаков. – Л., 1981. – 403 с.
4. Военно-полевая хирургия: учебник / под ред. Е. К. Гуманенко. – 2-е изд. – М., 2008. – 768 с.
5. Григорян, В. А. Защита бойца. Какие перспективы? / В. А. Григорян // Военный парад. – 2002. – № 1. – С. 24-26.
6. Смирнов, В. П. Оценка эффективности защиты армейских средств индивидуальной бронезащиты / В. П. Смирнов // Техника и вооружение. – 2013. – № 7. – С. 2-8.
7. Современные подходы к расчёту санитарных потерь: опыт медицинских служб вооружённых сил США и Великобритании / В. К. Журавлев, А. С. Голота, А. Б. Крассий [и др.] // Военно-медицинский журнал. – 2014. – № 1. – С. 56-57.
8. Пантюхов, А. П. Прогнозирование санитарных потерь / А. П. Пантюхов // Организация медицинского обеспечения Вооружённых сил. – 2007. – № 3. – С. 3-5.
9. Купол с плоским основанием как модель черепа человека при механических нагрузках / А. С. Повицкий, Б. А. Рабинович, В. М. Тардов [и др.] // Биофизика. – 1974. – Т. XIX. – Вып. 6.
10. Купрюнин, Д. Г. Современные бронешлемы – защитные структуры и технологии изготовления / Д. Г. Купрюнин, В. А. Григорян, Е. Н. Чистяков // Газета «ВПК», 20–27 марта 2012 г. и 28 марта – 4 апреля 2012 г.
11. Озерецковский, Л. Б. История и современное состояние огнестрельного оружия и средств индивидуальной бронезащиты / Л. Б. Озерецковский, Е. К. Гуманенко, В. В. Бояринцев // Журнал «Калашников», 2006. – 374 с.
12. Проблемы и тенденции создания шлемов с высоким уровнем защиты / Э. Н. Петрова, С. Ю. Чусов, А. В. Щербаков, В. П. Яньков, А. И. Егоров // Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. – 2012. – № 8. – С. 2-6.
13. Презентация «Использование высокоскоростной видеорегистрации для оценки параметров тыльной деформации при непробитии шлема поражающим элементом» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://spmt.ru/wp-content/uploads/2016/11/Prezentaciya-ZHukov_180915.pdf (дата обращения: 21.03.2019).
14. Пат. 2397467 Российская Федерация, МПК⁷. Стенд для определения защитных свойств бронешлемов / П. В. Трофимов, В. И. Мельников, В. В. Дворников [и др.]. – № 2008137999/02; заявл. 27.03.2010; опубл. 20.08.2010.
15. Пат. 2115957 Российская Федерация МПК G09B23/30. Модель головы / Ю. Н. Косенок, А. А. Котосов, М. В. Тюрин [и др.]. – заявл. 31.12.1996; опубл. 20.07.1998.
16. Рабинович, Б. А. О неправомерности использования критерия НИС (HEAD INJURY CRITERIA) для оценки травмобезопасности головы человека при ударе / Б. А. Рабинович, Н. А. Кулаков // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 5(94). – С. 10-15.
17. Феличано, Д. В. Травма. В 3 т. Т 3. / Д. В. Феличано, К. Л. Маттокс, Э. Е. Мур / пер. с англ.; под. ред. Л. А. Якимова, Н. Л. Матвеева. – М.: Изд-во Панфилова; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 576 с.
18. British Crown copyright 2003 / DSTL – published with the permission of the Controller of Her Majesty's Station – ary Office.
19. Dynamic Response Due to Behind Helmet Blunt Trauma Measured with a Human Head Surrogate / T. James, T. Mathis¹, N. Scott¹, P. Rory Bigger¹ and J. Mac Kiewicz Christopher J. Freitas¹ // International Journal of Medical Sciences. – 2014. – 11(5). – P. 409-425.
20. Horn, K. Lightning Body Armor / K. Horn. – U. S. Army Technical Report of RAND Corp., 2011. – 66 p.
21. Kneubuehl, B. P. Wound Ballistics: Basics and Applications Translation of the revised third German edition / B. P. Kneubuehl. – 2008. – 520 p.
22. Kleiven, S. Evaluation of head response to ballistic helmet impacts using the finite element method Magnus Aare / S. Kleiven // International Journal of Impact Engineering. – 2007. – Vol. 34. – P. 596-608.
23. MIL-H-44099A. Military Specification – Helmet, Ground Troops and Parachutists. U. S. Government Printing Office, 1986.
24. Purchase Description Helmet, Advanced Combat (ACH), CO/PD-05-4, Project Manager – Soldier Equipment, Program Executive Office, US Army. – 2007.
25. Purchase Description for Enhanced Combat Helmet Version 0.1, PD-ECH-ICE-PG16-0001. – 2009.
26. Watson, C. H. Ergonomics, design and reliability of body armour cranfield defence and security / C. H. Watson // Supervisor Professor Ian Horsfall January. – 2011. – 262 p.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ
SCIENTIFIC LIFE

Евстигнеев А. И., Шпилев А. М., Коневцов Л. А.
A. I. Yevstigneyev, A. M. Shpilyov, L. A. Konevtsov

**РУССКОМУ УЧЁНОМУ-МАТЕРИАЛОВЕДУ
ГРИГОРИЮ ВАЛЕНТИНОВИЧУ САМСОНОВУ 100 ЛЕТ**

**RUSSIAN SCIENTIST MAJOR IN MATERIAL SCIENCES
GRIGORY VALENTINOVICH SAMSONOV IS 100 YEARS OLD**

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе Комсомольского-на-Амуре университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: XXX@knastu.ru.

Mr. Alexey I. Yevstigneyev – Doctor of Engineering, Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Work, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: XXXX@knastu.ru.

Шпилев Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: XXXX@knastu.ru.

Mr. Anatoly M. Shpilyov – Doctor of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: XXXX@knastu.ru.

Коневцов Леонид Алексеевич – научный сотрудник УРАН Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: konevts@narod.ru.

Mr. Leonid A. Konevtsov – Researcher, Institute for Materials Technology, City of Khabarovsk Scientific Centre, the Far-Eastern branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: konevts@narod.ru.

*В науку вписан навсегда,
В историю страны своей,
И Родина навек горда
Одним из лучших сыновей...*

*Л. А. Осветимский, 1975,
в память о Г. В. Самсонове*

В текущем, 2018 году, исполняется 100 лет Григорию Валентиновичу Самсонову (1918–1975), русскому учёному-материаловеду, члену-корреспонденту АН УССР, лауреату ряда государственных и именных (имени Е. О. Патона, Д. И. Менделеева, П. Г. Соболевского) премий за заслуги в области химии и технологии неорганических материалов. Его плодотворная деятельность в области науки о материалах отражена в публикациях более 1200 научных работ, 40 монографий, в том числе переизданных в США, других странах. Под его руководством защищены более 120 кандидатских и около 40 докторских диссертаций, при его непосредственном участии был организован головной институт в СССР по материаловедению (Институт проблем материаловедения АН УССР), а прожил он всего 57 лет, 5 из которых ушло на участие в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.

Рабочий кабинет Григория Валентиновича Самсонова (см. рис. 1) остаётся и сегодня таким, каким был до 1975 года – живым напоминанием о человеке, внесшем огромный вклад в развитие науки о материалах, авиационной, атомной, металлургической промышленности, порошковой металлургии, электронного строения металлов и сплавов; о человеке, который исследовал и обобщил данные по свойствам элементов и тугоплавких соединений.



Рис. 1. Рабочий кабинет Григория Валентиновича сегодня

В память о Григории Валентиновиче академиками, учёными в области наук о материалах П. С. Кислым [21] (см. рис. 2) и М. М. Ристичем [22] (см. рис. 2) в 1983 году было предложено все тугоплавкие соединения объединить в один класс – «самсониды». Памяти Г. В. Самсонову был посвящён капитальный труд ряда известных материаловедов СССР «Неорганическое материаловедение в СССР», изданный в 1983 году [13]. С целью развития идей Г. В. Самсонова публиковались материалы в сборниках международных симпозиумов «Самсоновские чтения», проводимых Институтом материаловедения ХНЦ ДВО РАН (г. Хабаровск), основателем и директором которого являлся его ученик, заслуженный деятель науки, доктор технических наук А. Д. Верхотуров (см. рис. 2), а активными участниками были многие выдающиеся учёные в области наук о материалах, в том числе наш земляк (дальневосточник) академик А. И. Холькин (см. рис. 2) и многие другие. Кроме того, «Самсоновские чтения» проводились Институтом проблем материаловедения НАНУ (г. Киев), где они и проводятся периодически до сих пор.



Рис. 2. Сопратники и последователи Г. В. Самсонова (слева направо):
П. С. Кислый, М. М. Ристич, А. Д. Верхотуров, А. И. Холькин

Исторически наука о материалах прошла большой путь своего развития, в том числе при жизни Г. В. Самсонова и до настоящего времени. Менялись теории, направления, гипотезы, появлялись новые материалы. Поэтому и анализ научной деятельности Самсонова следует рассматривать в условиях развития материаловедения от его истоков и до наших дней.

В литературе, по нашим данным, не имеется систематических сведений о развитии наук о материалах, так как эти науки возникли в разное время и шли различными путями к решению проблемы материала. Не обозначены основные этапы, узловые моменты и периоды, которые позволили бы разработать временные линии развития обобщающей науки о материалах для создания теоретических, концептуальных и методологических основ. В условиях анализа становления и развития единой науки о материалах, прогнозирования дальнейшего пути её развития возможно



определение значимости тех или иных идей и вклада учёных. В этих условиях существенно изменится и резко возрастает значимость Г. В. Самсонова: он встаёт в ряд самых выдающихся учёных, и, на наш взгляд, может стать «научным маяком» не только для материаловедов.

Для возможности анализа и обобщения научных данных используется мера развития науки – парадигма, предложенная известным учёным Томасом Куном [8]. Парадигма отражает концептуальную основу новых этапов развития науки, является моделью постановки проблем и их решений.

Первые сведения о возникновении практической идеи создания искусственных материалов, по ряду оценок, относят к VII–V тысячелетиям до н. э. Можно с уверенностью сказать, что уже в то время (в ряде исторических источников указываются и более ранние сроки) народы неолита начали использовать керамику, саман, самородное золото, медь, железо. В III тысячелетии до н. э. народы Моравии, Каргалы, Аркаима, а также народы, проживавшие в древности на землях нынешней Турции, Палестины, Египта, а затем Ирана, северо-востока Китая, Индии начали использовать медные сплавы; во II тысячелетии до н. э. – железо и его сплавы, другие металлы были основными материалами, определяющими развитие цивилизации. В инкубационный период созревания практической и познавательной идей в узком кругу одарённых людей накапливались знания о технологии получения и обработки материалов, которые хранились в глубокой тайне (см. рис. 3). Тысячелетиями технология получения материалов развивалась без поддержки науки. За это время многие тайны производства и обработки материалов были утеряны и возрождались вновь. Но была руководящая идея, которая остаётся актуальной: получить наиболее твёрдый материал («как камень»), но пластичный и который хорошо бы обрабатывался («как медь»).

Человечество всегда интересовало «кирпичики» материи, из которых состоит окружающий мир. Ещё в древней Греции в русле познавательной идеи возникли две различные парадигмы, являющиеся концептуальными основами структуры материи. Первая парадигма (парадигма Аристотеля и Платона) – «стихийная», вторая парадигма – парадигма Демокрита, впервые употребившего слово «атом», – «атомная», не получившая должного признания и ставшая основой наук о материалах лишь в наше время. В то время как парадигма Платона и Аристотеля сыграла выдающуюся роль в развитии алхимии, химии, металлургии, минералогии, металлургия получала новые «металлические» материалы, но для дальнейшего повышения уровня свойств необходим был научный подход. В металлургии требовалось обобщение накопленных эмпирических знаний, и это сделал Георг Агрикола (1556) (см. рис. 4). Алхимия же не получила в дальнейшем развития, так как её фундаментом была парадигма Аристотеля.

Вместо алхимии появились химия и физикохимия М. В. Ломоносова (1738–1763), впервые употребившего слово «молекула», труды которого стали основой научной металлургии. Атомная парадигма постепенно становилась основным фундаментом развития наук о материалах. Как писал Г. В. Самсонов [15], среди гениальных работ Ломоносова одно из важнейших мест занимают классические исследования физической химии, впервые созданной им как самостоятельной дисциплины, впоследствии ставшей основой теории металлургических процессов. В своей работе Г. В. Самсонов отмечает, что после Ломоносова металлургия превратилась из ремесла в научную дисциплину.

Следует отметить глубокую проницательность М. В. Ломоносова, впервые заметившего взаимосвязь «состав→технология→структура→свойства» при исследовании соединений металлов [12]. Используя микроскоп, он определил, что по составу железо отличается от чугуна тем, что «имеет в себе ещё постороннюю, грубую, земляную материю, и для того бывает ломко». Сравнивая по составу медь и сплавы железа, Ломоносов пишет: «Вязкость его (железа), хотя и нарочита, однако меньше, нежели меди. Железо разделяется (по технологии) на два рода, на литое и на ковкое». «Кованого доброта (свойство) распознаётся по следующим признакам (структуры): 1. Ежели которое в лому имеет крупные, плоские и светлые зёрна неравной величины и разной фигуры, то весьма ломко и в дело почти негодно. 2. Чем зёрна мельче и величиною и фигурою сходне, тем оно к делу удобнее (структура→свойства). 3. За лучшее почитается то, которое состоит из жилок, лежащих вдоль по пруту; оно тем превосходнее, чем оные зёрнышки мельче, а особливо когда оно в лому жиловато, как изломленное дерево (структура→свойства), и притом от молота не щелится

и плёнок не показывает и, будучи раскалено добела, тянется, как густая смола (технология→структура). Упругостию уступают железу все металлы, которая может быть в нём чрез искусство умножена, равно как и твёрдость (свойство). В такое состояние приведён будучи, сей металл называется сталью. Звонкость в нём меньше, нежели в меди, но сталь звонче, нежели простое железо» [12]. Вероятно, суждения М. В. Ломоносова впоследствии привели Г. В. Самсонова к обоснованию его научной парадигмы материаловедения. Кроме того, труды Ломоносова явились предпосылками осознания зависимости свойств веществ от их химического состава. К этому времени назрела необходимость создания концептуальной схемы, которая должна быть отработана на модельных материалах, то есть элементах.

В 1861 году новый научный подход по изучению поиска новых материалов (элементов) предложил Д. И. Менделеев на основе разработанной им эмпирическим путем таблицы элементов. Впервые в мировой науке была чётко установлена связь атомных весов и химического состава. Это был величайший научный подвиг – прорыв в науках о материалах, с которого началась, собственно, наука о прогнозировании свойств веществ. Появилась первая концептуальная основа, модель постановки проблем и их решения – парадигма Менделеева – «элементный состав→свойство» (см. рис. 3, 4). Первостепенная важность этого исторического события для науки о материалах была подтверждена Международным обществом учёных-материаловедов TMS [20].

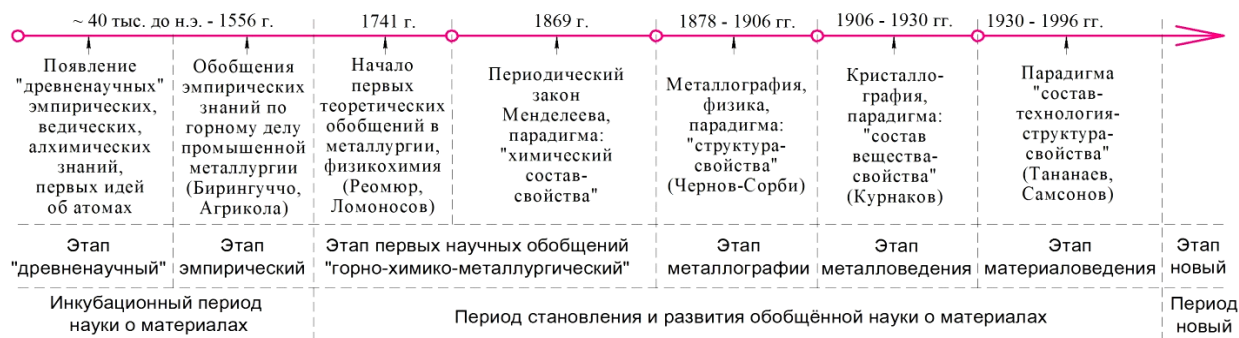


Рис. 3. Периоды и этапы развития науки о материалах

В дальнейшем детальное исследование железоуглеродистых сталей показало, что на их свойства значительное влияние оказывает структура (микроструктура, кристаллическая и так далее) материала, что привело к обоснованию металлографии и следующей парадигмы создания материалов «структура→свойство» Д. К. Чернова и Г. К. Сорби (см. рис. 3, 4).

Следующим этапом в развитии науки о материалах была парадигма Н. С. Курнакова, основателя физико-химического анализа: «состав вещества→свойство», но уже не элементов, а соединений. Появилось множество диаграмм состояний, позволяющих прогнозировать в металловедении многие свойства соединений [18] (см. рис. 3, 4).

Затем академиком И. В. Тананаевым [19] была предложена трёхзвенная парадигма «состав→структура→свойства». И если раньше парадигмы были основой веществоведения, то парадигма Тананаева стала основой материаловедения (см. рис. 3, 4). Более того, И. В. Тананаев [19] предлагал четырёхзвенную «структурную» парадигму материаловедения: «состав→структура→дисперсность→свойства», подразумевая под дисперсностью «размеры частиц, наименьшие из которых граничат с молекулярным уровнем». Таким образом, И. В. Тананаев стоял у истоков наноматериаловедения. Однако это направление (в начале 70-х гг. XX века) не получило поддержки от научной общественности СССР, затем РФ, а за рубежом вызвало настоящий ажиотаж («нанобум»).

Развитию науки о материалах и изучению взаимосвязи «состав→структура→свойства» значительно способствовало использование оптических, спектральных, рентгеновских установок и других устройств и приборов [2; 5]. Однако в начале XX века резко встал вопрос не только об изучении материалов и их улучшении, но и о создании принципиально новых материалов.

В этих условиях парадигма Тананаева уже не могла быть фундаментом принципиально нового направления науки о материалах. Потребности практики настоятельно ставили задачу разработки теории и технологии создания перспективных материалов.

1.	Парадигма Менделеева: <i>"Химический состав элементов-свойства"</i>	1869 г.
2.	Парадигма Чернова-Сорби: <i>"Структура-свойства"</i>	1878 г.
3.	Парадигма Курнакова: <i>"Состав вещества-свойства"</i>	1906 г.
4.	Парадигма Тананаева: <i>"Состав-структура-свойства"</i>	1939 г.
5.	Парадигма Самсонова: <i>"Состав-технология-структура-свойства"</i>	1975 г.
6.	Парадигма нового этапа НМ: <i>"Функциональное назначение материала-состав сырья-технология ИКВМ-$f(\Phi)$-структура-свойства материала"</i>	2006 г.

Рис. 4. Парадигмы в развитии практической идеи в науке о материалах

Прошло более двух столетий со времён М. В. Ломоносова, впервые обратившего внимание на взаимосвязь «состав→технология→структура→свойства» материала [12], но только в 1970 году материаловед Самсонов вновь поднял вопрос о взаимосвязи «состав→технология→структура→свойства» и значительно проработал его – до уровня основной парадигмы материаловедения, в результате чего предложил новую парадигму [17], устраняющую недостаток предыдущей, а также поднял науку о материалах на новую ступень развития. При этом Г. В. Самсонов, И. Ф. Прядко, Л. Ф. Прядко отмечали, что «центральной категорией в материаловедении постепенно становится категория «структуры»» [17] (см. рис. 5).

Зависимость вида свойств $F = f(\Phi)$ параметрически выражается через «структуру» посредством двух функциональных связей: 1) свойства: $(F) = f(\text{«структура»})$; 2) структура: $(\Psi) = f(\text{«состав»})$ с очевидным законом взаимосвязи этих трёх функций: $F = \Phi \cdot f \cdot \Psi$ (см. рис. 5).

В работах Г. В. Самсонова в качестве ключевой характеристики материала становится категория «структуры». Одной из главных её особенностей является «многоэтажность», позволяющая говорить о структуре «структуры». На данном этапе развития науки о материалах конечным звеном в иерархической последовательности подструктур является электронная структура. На соответствующем уровне знаний она не может быть сведена к структурам других типов и выводится из «первых принципов» квантовой механики – наиболее фундаментальных законов, описывающих движение материи. Использование этой характеристики наряду с понятиями «технология» и «свойства» знаменовало начало важного этапа научной деятельности по изучению материала на уровне дефектов и несовершенств кристалла, на уровне кристаллической структуры, на уровне электронной структуры, при этом Г. В. Самсоновым признаётся своеобразная структурная (Ψ) иерархия: макроструктура→микроструктура→атомная (дислокации, точечные дефекты, примеси, нестехиометрия)→кристаллическая→электронная структуры (см. рис. 5). Каждый из этажей этой иерархии самостоятельно влияет на «структурные» свойства и может рассматриваться самостоятельно.

Все «этажи» структур объединяются в единое целое, так как между «этажами» существует «взаимодействие» и каждый из верхних «этажей» может быть описан достаточно глубоко лишь в терминах более детального структурного уровня. Электронная структура занимает особое место в этой иерархической последовательности структур. Она не может быть выражена через структуру более глубокого уровня на данном этапе развития науки и должна выводиться из «первых прин-

ципов» – наиболее общих законов, описывающих движение материи, в частности, из уравнения Шрёдингера [17].

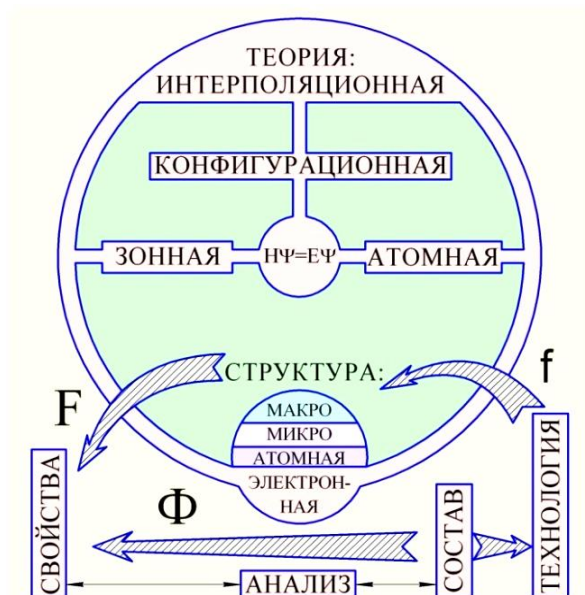


Рис. 5. Парадигма Г. В. Самсонова «состав→технология→структура→свойства», где Φ, f, F – функциональные зависимости составляющих звеньев

Электронная структура является той общей основой, через которую могут быть выражены все другие типы структур. Например, задача прогнозирования свойств (см. рис. 6), а следовательно, и создания материалов, сводится к задаче описания основных особенностей их электронной структуры [16].



Рис. 6. Прогнозируемая схема получения новых функциональных материалов

В последние годы своей короткой жизни Григорий Валентинович Самсонов осознавал, что для создания новых материалов, прогнозирования их свойств необходима теоретическая база (см. рис. 6). Он пришёл к выводу, что центральной категорией в материаловедении постепенно становится категория «структуры», а понятия «свойства» и «технология» тоже относятся к ней. Самсонов предполагал, что прогнозирование свойств должно подняться на качественно новую



ступень: простейшие принципы ассоциации и корреляции уступают место прямому вычислению физико-химических характеристик. Однако в этом направлении не было единого мнения у физиков, химиков, материаловедов. Физика «шла» к построению твёрдого тела, отправляясь от электронов и ядер, химия – от молекул, материаловедение – от атомов. Для физиков в этом вопросе важнейшее влияние оказало то обстоятельство, что в рамках модели зон удалось значительно быстрее преодолеть трудности математической формализации теории и перейти к количественным расчётам хотя бы в одноэлектронном приближении. Более сложным образом развивалась теория электронных состояний в квантовой химии твёрдого тела, где методы валентных связей и молекулярных орбиталей используются на равных правах. Атомная модель нашла эффективное использование в области технологии неорганических веществ.

На наш взгляд, в смысле интуитивного восприятия теории электронного строения конденсированных систем Г. В. Самсонов обогнал свою эпоху. И в тоже время вследствие преждевременного ухода из жизни не смог и не успел выразить свои идеи в отчётливых физических терминах, хотя в этот период параллельно и независимо уже развивались новые методы решения уравнения Шрёдингера, созвучные его идеям. Самсонов не абсолютизировал свои взгляды. Как он заявлял, они являются лишь «временными конструкциями» и должны заменяться по мере развития физики и химии твёрдого тела. Удивляет его смелость противопоставлять свои идеи господствующей тогда одноэлектронно-зонной теории, наработанным методам компьютерных расчётов электронной структуры веществ и материалов.

Корректное описание электронной структуры можно получить, отправляясь от любого из исходных приближений – полностью свободных электронов (зонная модель) или полностью свободных атомов (атомная модель) – путём последующего учёта внутриатомных (в первом случае) и межатомных (во втором) взаимодействий. Григорий Валентинович хотел объединить эти две модели и дать материаловедам на первом этапе предварительные сведения об областях наиболее перспективного поиска материалов с требуемыми свойствами и в дальнейшем уточнить структуру систем путём последовательного перехода к расчётам в более высоком приближении. При этом «движение» должно быть в сторону атомной модели.

Практически до конца XX века преобладал эмпирический подход к проблеме создания перспективных материалов, основанный на парадигме Г. В. Самсонова, возможности которого не позволяли в полной мере осуществить разработку теории создания материалов с заданными свойствами.

В недрах эмпирического подхода стал развиваться структурно-аналитический подход («электронное материаловедение») [1; 14], основанный на изучении влияния электронной структуры материала на его свойства, расчёт свойств на электронном уровне, так как электронная структура является «той общей основой, через которую могут быть выражены все другие типы структур». С появлением новой компьютерной техники возможности данного подхода постоянно увеличиваются. Вслед за структурно-аналитическим подходом возникло компьютерное моделирование материалов, имеющее значительные перспективы в решении проблемы создания материалов с заданными свойствами. В настоящее время не представляется возможным для функциональных материалов определить состав, структуру и свойства, используя только метод компьютерного моделирования, в связи с чем предлагается упрощённая схема получения функциональных материалов (см. рис. 7), которая использовалась при создании электродных материалов для электроискровой обработки.

С использованием подходов, о которых было изложено выше, в XX веке достигнуты значительные успехи в создании материалов с заданными свойствами. Были созданы сверхпроводники, полупроводники, композиты, новая керамика, сплавы с памятью формы, тугоплавкие соединения и так далее. Кроме того, свойства ранее разработанных эмпирическим путём материалов были значительно улучшены.

Можно утверждать, что в конце XX века наступил новый этап в развитии науки о материалах, основанный на структурно-аналитическом подходе для решения проблемы материалов с заданными свойствами. Таким образом, в настоящее время наука о материалах имеет два основных

подхода к проблеме создания и получения перспективных материалов: экспериментальный и структурно-аналитический, который имеет большое будущее для дальнейшего развития науки о материалах. Следует отметить, что сочетание двух вышеупомянутых подходов имеет большое значение в развитии науки о материалах, если не сказать – является основным направлением.

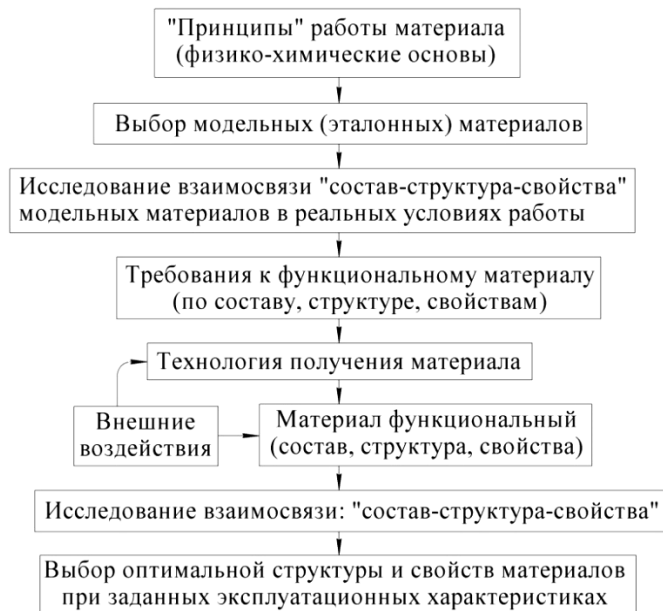


Рис. 7. Реальная схема получения функциональных материалов

Впоследствии многие учёные-материаловеды поняли, что формирование новой науки о материалах должно быть основано на изучении электронной структуры и выводах физики твёрдого тела и химии твёрдого тела. В конце XX – начале XXI века произошли масштабные изменения вектора развития человеческой цивилизации, повлиявшие как на развитие науки в целом, так и науки о материалах в частности: наряду с понятиями «металловедение» и «материаловедение», достаточно широко признанным стало понятие «материалогия». Материаловедение является важнейшей составной частью материалогии [5]. Кроме того, важными составляющими материалогии являются минералогия и кристаллография, металловедение, материалогия поверхности, энтропийно-экологическая материалогия и другие разделы.

В связи с появлением нового этапа в развитии науки о материалах, назрела необходимость формулировки её новой парадигмы, которая должна объединить все науки (или их разделы) о материалах – металлургию, химию, физику, минералогия, кристаллографию, технологию обработки материалов в одну науку, способную объединить теорию и практику создания материалов с заданными свойствами. В конце XX века решением этой задачи занялся учёный-материаловед, ученик Г. В. Самсонова, дальневосточник, заслуженный деятель науки доктор технических наук А. Д. Верхотуров. Он отмечал, что деятельность Г. В. Самсонова оказала значительное влияние на его судьбу; с величайшим почтением отзывался о нём как о своём учителе и друге. По мнению А. Д. Верхотурова, без научной деятельности Г. В. Самсонова ещё долгие годы остался бы незамеченным новый этап в развитии науки о материалах – «материалогия», имеющий новую парадигму (см. рис. 2), предложенную А. Д. Верхотуровым и его соратниками, построенную на базе парадигмы Самсонова, в которой вводится дополнительное звено ФН – функциональное назначение материала («принципы работы материала»). Следует отметить, что Г. В. Самсонов неоднократно отмечал необходимость учёта «принципа работы материала». С учётом этого «принципа» (функционального назначения материала – ФН) схему получения материалов можно представить в таком виде: «ФН→состав→технология→структура→свойства». Чёткая общая формулировка, глубокое осознание и формулировка уточнений ФН вплоть до методологической проработки по-

следовательности действий предопределяют успех создания того или иного материала, а ошибки, допущенные на этапе ФН, в дальнейшем неисправимы.

Следует отметить, что признак ФН материалов учитывал в своих суждениях ещё М. В. Ломоносов, давая им общую формулировку и частично уточнения: «Металлы отверзают недра земные к плодородию (...по признаку ФН) служат нам в ловлении земных и морских животных для пропитания нашего... и кратко сказать, ни едино художество, ни едино ремесло простое употребление металлов миновать не может» [9]. «Металлы подают укрепление и красоту важнейшим вещам, в обществе потребном, или защищают от нападения неприятельского, или утверждают корабли и силою их связав, между бурными вихрями в морской пучине безопасно плавают. Металлы отверзают недра земные к плодородию, служат нам в ловлении земных и морских животных для пропитания нашего... и кратко сказать, ни едино художество, ни едино ремесло простое употребление металлов миновать не может» [11]. Он первым обратил внимание на экологический фактор при добыче и создании металлов [10].

Требования к составу, структуре и свойствам материала определяются на этапе ФН материала и должны являться базой для компьютерного моделирования. В результате расчёта необходимых состава, структуры и свойств осуществляется выбор и осуществление технологии, затем – исследование свойств. В зависимости от полученных свойств материала может быть осуществлена корректировка структуры, состава и технологии его получения и обработки. Технология материалов, по существу, является наукой о превращении вещества в материал и является также важнейшей частью материаловедения. Поэтому в формулировке новой парадигмы нового этапа в развитии науки о материалах последователями Г. В. Самсонова А. Д. Верхотуровым и его соратниками, кроме введения звена ФН, уточнено также и понятие звена «технология». В новой парадигме (см. рис. 8) технология рассматривается с учётом влияния ЦКВМ – производственно-экологического циклического круговорота вещества и материалов во «второй природе» при минимальном повышении энтропии в биосфере Земли [5; 7].

ФН→Состав→Технология $ЦКВМ=f(\Theta^*)$ →Структура→Свойства

Рис. 8. Новая парадигма нового этапа в развитии науки о материалах – материаловедения

Можно с уверенностью сказать, что идеи Г. В. Самсонова и М. В. Ломоносова фактически заложены в основе парадигмы новой синтезированной обобщающей науки о материалах – материаловедения, целью которой является разработка принципов создания, получения материалов с заданными свойствами.

В последние годы своей жизни Г. В. Самсонов (см. рис. 9) взваливал на себя непосильные задачи в области развития наук о материалах и, тонко чувствуя перспективные научные направления, сходу принимался за дело. Написал монографию «Электронная локализация в твёрдом теле» [17], которая вызвала неоднозначные отклики – от восторженных до скептических. Эта работа сыграла огромную роль для материаловедов, технологов и продолжила своё развитие даже на Дальнем Востоке [3; 4; 6].

Через несколько часов после зимнего солнцестояния 1975 года Григория Валентиновича не стало... Ушёл от нас учёный-материаловед, внёсший существенный вклад в науку о материалах. На наш взгляд, базой его успехов была не интуиция, а титаническая работа. Самсонов «перекомбинировал» практически всю Периодическую систему, опубликовав около 40 монографий по карбидам, боридам, нитридам, оксидам, гидридам, берилидам, халькогенидам, силицидам, сульфидам и другим «самсонидам». Он имел потребность и возможность изложить теоретикам «рецепты», по которым им были синтезированы более 300 новых тугоплавких соединений; он прогнозировал их свойства и находил области их функционального назначения в производстве.

	КОМИТЕТ ПО ГОСУДАРСТВЕННЫМ ПРЕМИЯМ УКРАИНСКОЙ ССР В ОБЛАСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ УССР	Премия присуждена постановлением ЦК Компартии Украины и СМ УССР № 502 от 13.12.1983 г. Диплом и Почетный знак № 1979
	УЧЕТНАЯ КАРТОЧКА ЛАУРЕАТА ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРЕМИИ УССР 19 83. (1969) (в области науки и техники) Псевдарино	
Область науки <u>материаловедение</u> Специальность <u>химик-технолог</u> отрасль производства		
1. Фамилия, имя и отчество <u>САМСОНОВ Григорий Валентинович</u>		
2. Год рождения <u>1918</u> 3. Национ. <u>РУССКИЙ</u> 4. Партийн. <u>член КПСС</u>		
5. Ученая степень и ученое звание <u>профессор, доктор т.н., чл.-корр. АН УССР</u>		
6. Почетное звание <u>заслуж. деятель науки и техники УССР</u>		
7. Название премированной работы <u>"Создание и внедрение в авиационную и другие отрасли промышленности материалов, оборудования и технологии детонационного напыления покрытий, значительно повышающих надежность и ресурс машин и механизмов"</u>		
8. Должность и место работы <u>замест. директора по науке Института проблем материаловедения АН УССР</u>		

Рис. 9. Самсонов Григорий Валентинович. Учётная карточка лауреата Государственной премии УССР

Даже бегло проанализировав путь Григория Валентиновича Самсонова в области наук о материалах, можно сделать следующий вывод: его имя как учёного-материаловеда следует поставить рядом с именами таких корифеев, «маяков» науки о материалах, как М. В. Ломоносов, Д. И. Менделеев, Д. К. Чернов, Г. К. Сорби, Н. С. Курнаков, И. В. Тананаев и многих других, внёсших существенный вклад в её становление и развитие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атомистическое моделирование материалов / В. В. Покропивный, Ю. И. Роговой, В. В. Огородников [и др.]. – Киев: ИПМ имени И. Н. Францевича НАН Украины, 2008. – 240 с.
2. Верхотуров, А. Д. Введение в материаловедение / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилев. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 780 с.
3. Верхотуров, А. Д. Материаловедение / А. Д. Верхотуров // Вестник ДВО РАН, 2004. – № 5. – С. 80-86.
4. Верхотуров, А. Д. Начала материаловедения / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилев. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2008. – 437 с.
5. Верхотуров, А. Д. Основы материаловедения: моногр. В 2 т. Т. 1 / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилев, А. И. Евстигнеев. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 270 с.
6. Верхотуров, А. Д. Основы материаловедения. В 2 т. Т. 2 / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилев, А. И. Евстигнеев. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 654 с.
7. Верхотуров, А. Д. Энтропийно-экологическая материаловедение / А. Д. Верхотуров, Б. А. Воронов, Л. А. Коневцов // Экология промышленного производства. – 2012. – № 1. – С. 5-15.
8. Кун, Т. Структура научных революций / Т. Кун. – М.: Прогресс, 1977. – 300 с.
9. Ломоносов, М. В. Избранные философские произведения / М. В. Ломоносов. – М.: Гос. изд-во полит. литер., 1950. – 444 с.
10. Ломоносов, М. В. О вольном движении воздуха, в рудниках примеченном / М. В. Ломоносов // Первые основания металлургии или рудных дел. – СПб: Императорская Академия наук, 1763. – 416 с. (с. 223-236, Прибавление первое).



11. Ломоносов, М. В. Полное собрание сочинений / М. В. Ломоносов. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1951–1959. – Т. 1-10.
12. Ломоносов, М. В. Полное собрание сочинений. В 10 т. Т. 4. Metallurgy / М. В. Ломоносов. – СПб.: Изд-во Императорской Академии наук, 1803. – 294 с.
13. Неорганическое материаловедение в СССР / под ред. И. Н. Францевича. – Киев: Наукова думка, 1983. – 720 с.
14. Неорганическое материаловедение. Основы науки о материалах / под ред. Г. Г. Гнесина, В. В. Скорохода. – Киев: Наукова думка, 2008. – 1152 с.
15. Самсонов, Г. В. М. В. Ломоносов и металлургическая наука / Г. В. Самсонов // Порошковая металлургия. – 1961. – № 6. – С. 5-9.
16. Самсонов, Г. В. Проблема создания неорганических веществ и материалов с заданными свойствами (доклад прочитан в Сербской академии наук и искусств 26.06.1975) / Г. В. Самсонов // Порошковая металлургия. – 2002. – № 9-10. – С. 118-133.
17. Самсонов, Г. В. Электронная локализация в твёрдом теле / Г. В. Самсонов, И. Ф. Прядко, Л. Ф. Прядко. – М.: Наука, 1976. – 338 с.
18. Соловьев, Ю. И. Николай Семёнович Курнаков: 1860–1941 / Ю. И. Соловьев. – М.: Наука, 1986. – 272 с.
19. Тананаев, И. В. Основные этапы развития неорганического материаловедения в СССР. В кн. «Неорганическое материаловедение в СССР» / И. В. Тананаев. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 8-29.
20. JOM'S The Greatest Moments in Materials' Science and Engineering // JOM. – 2006. – № 2. – P. 1-8.
21. Kislyi, P. S. Samsonides – new materials characterizing our epoch. Science of Sintering / P. S. Kislyi // Spec. issue devoted to G. V. Samsonov. – 1984. – Vol. 16. – P. 25-31.
22. Ristich, M. M. Samsonov's deeds belong to eternity Science of sintering / M. M. Ristich // Spec. issue devoted to G. V. Samsonov. – 1984. – Vol. 16. – P. 1-2.