



Научно – технический журнал  
Издается с 1995 года  
Выходит шесть раз в год  
**№ 1 (315) 2016**  
Январь – Февраль

# Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
(ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»)

## Редакционный совет:

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф.,  
председатель  
Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф.,  
зам. председателя  
Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.,  
зам. председателя  
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц.,  
секретарь  
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.  
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.  
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.  
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.  
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.  
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.  
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

## Редколлегия

Главный редактор  
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.,  
заслуженный деятель науки Российской Федерации

## Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.  
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.  
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

## Члены редколлегии:

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)  
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Зубчанинов В.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Клименко С.А. д-р техн. наук, проф. (Украина)  
Колесников К.С. д-р техн. наук, проф.,  
академик РАН (Россия)  
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)  
Мирсалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф.  
(Азербайджан)  
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф., академик  
РАН (Россия)  
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф.  
(Беларусь)  
Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

## Ответственный секретарь:

Тюхта А.В. канд. техн. наук

## Адрес редакции

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 54-15-19, 55-55-24, 41-98-48,  
41-98-03, +7(906)6639898  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: tiostu@mail.ru

Зарег. в Федеральной службе по  
надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство ПИ № ФС77-47351  
от 03 ноября 2011 года

Подписной индекс 29504  
по объединенному каталогу  
«Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2016

## Содержание

### Естественные науки

Малик А.В., Белая Л.А., Лавит И.М. О динамическом нагружении тела с трещиной в условиях плоской деформации .....	3
Велиев Ф.Э. Взаимодействие зон ослабленных межчастичных связей материала в изотропной среде при неоднородном напряженном поле .....	11
Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В., Журавков М.А. Переменное деформирование трехслойного стержня локальной синусоидальной нагрузкой .....	19

### Моделирование технологических процессов

Малинин В.Г., Муссауи Ю.Ю., Трифонов Е.А. Исследование мартенситной неупругости сплава Ti-50%Ni при сложных траекториях деформирования в виде спирали Архимеда: результаты эксперимента, математическая модель .....	29
--	----

### Конструирование, расчеты, материалы

Голенков В.А., Вдовин С.И., Дорофеев О.В., Татарченков Н.В., Джамиц Е.В. Экспериментальная установка для гибки труб наматыванием .....	35
Фёдоров Т.В., Морев П.Г. Nurbs-аппроксимация экспериментальных кривых упрочнения. практическая реализация .....	41

### Машиностроительные технологии и инструменты

Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Влияние ультразвуковой обработки на шероховатость поверхности деталей, полученных аддитивными технологиями .....	47
Смоленцев Е.В., Кадырметов А.М., Кондратьев М.В., Бобров Е.С. Оптимизация процесса нанесения плазменных упрочняющих покрытий .....	54
Емельянов С.Г., Мальнева Ю.А., Куц О.Г. Назначение требований к точности металлорежущего инструмента на основе установления взаимного влияния основных элементов металлорежущей системы на погрешность обработки .....	60
Панайоти В.А. Исследование геометрии рельефа режущей поверхности эльборового круга при шлифовании с твердой смазкой .....	67
Лавриненко В.И., Скрябин В.А., Пасичный О.О., Солод В.Ю., Сытник А.А. Влияние свойств твердых сплавов на их обрабатываемость алмазными кругами .....	72
Смоленцев В.П., Золотарев В.В., Сухочев Г.А. Формирование показателей поверхностного слоя комбинированной обработкой .....	82
Ямников А.С., Ямникова О.А., Киселев А.В. Погрешность закрепления при консольном закреплении тонкостенной трубной заготовки, имеющей исходную овальность .....	90
Носенко В.А., Авилов А.В., Ладыгина О.М., Дума Е.А. Морфология и химический состав площадки износа карбида кремния после микроцарапания вольфраманом скорости 60 м/с .....	97

### Приборостроение и биотехнические системы

Шкатов П.Н., Лисицина И.О. Сравнительное исследование дефектометрических электропотенциальных преобразователей с различным размещением электродов .....	105
Жидков А.В., Жильцов М.П., Лупандин А.А., Вьюн С.С., Лобода О.А., Мишин В.В., Подмастерьев К.В. Программно-аппаратный комплекс для испытаний эндопротеза тазобедренного сустава с парой трения «металл-металл» .....	111
Корневский Н.А., Магеровский М.А., Шуткин А.Н., Федянин В.И. Нечеткие модели профессиональной ориентации и оценки уровня подготовки спортсменов .....	121
Иванов Ю.В., Распопов В.Я., Алагуев Р.В. Маятниковый датчик уровня с электромагнитным демпфированием для контроля горизонтальности железнодорожного пути .....	127
Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л., Пирожникова О.И. Моделирование динамики электромеханических элементов датчиков систем управления .....	131

### Контроль, диагностика, испытания

Дрёмин В.В., Дрёмина Е.В., Жарких Е.В., Потапова Е.В., Алимичева Е.А., Масалыгина Г.И., Дунаев А.В. Возможности применения сочетанных методов оптической неинвазивной диагностики при исследовании жизнеспособности тканей нижних конечностей пациентов с сахарным диабетом .....	136
Горина М.А., Грядунова Е.Н., Горин А.В. Контроль гибких трубопроводов на герметичность .....	143



The journal is published since 1995  
The journal is published 6 times a year

**№ 1 (315) 2016**

January – February

# Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Educational Professional Institution  
«State University – Education–Scientific–Production Complex»  
(State University ESPC)

## Editorial council

**Golenkov V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
president  
**Pilipenko O.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
vice-president  
**Radchenko S.Y.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
vice-president  
**Borzenkov M.I.** Candidate Sc. Tech.,  
Assistant Prof, secretary  
**Astafichev P.A.** Doc. Sc. Law., Prof.  
**Ivanova T.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Kolchunov V.I.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Konstantinov I.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Novikov A.N.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Popova L.V.** Doc. Sc. Ec., Prof.  
**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.

## Editorial Committee

### Editor-in-chief

**Stepanov Y.S.** Doc. Sc. Tech., Prof., honored  
worker of science of Russian Federation

### Editor-in-chief Assistants

**Barsukov G.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Gordon V.A.** Doc. Sc. Tech., Prof.  
**Podmasteryev K.V.** Doc. Sc. Tech., Prof.

### Member of editorial board

**Babichev A.P.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Buchach A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)  
**Vdovin S.I.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Dyakonov A.A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Emelyanov S.G.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Subchaninov V.G.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Ivanov B.R.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Kirichek A.V.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Klimenko S.A.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)  
**Kolesnikov K.S.** Doc. Sc. Tech., Prof.,  
Academician of RAS (Russia)  
**Kopylov Y.R.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Malinin V.G.** Doc. Sc. Ph. - Math., Prof. (Russia)  
**Mirsalimov V.M.** Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.  
(Azerbaijan)  
**Mulyukin O.P.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Osadchy V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Panin V.E.** Doc. Sc. Tech., Prof. Academician  
of RAS (Russia)  
**Raspopov V.Ya.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Smolentsev V.P.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)  
**Starovoitov A.I.** Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.  
(Belarus)  
**Heifets M.I.** Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

### Executive secretary:

**Tyukhta A.V.** Candidate Sc. Tech.

### Address

302020 Orel,  
Nauorskoe Chosse, 29  
(4862) 54-15-19, 55-55-24, 41-98-48,  
41-98-03, +7(906)6639898  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: tiostu@mail.ru

Journal is registered in Federal Agency of  
supervision in sphere of communication,  
information technology and mass  
communications. The certificate of registration  
PI № FS77-47351 from 03.11.2011

Index on the catalogue of the «Pressa  
Rossii» 29504

© State University ESPC, 2016

## Contents

### Natural sciences

<i>Malik A.V., Belaya L.A., Lavit I.M. On a dynamic loading body with a crack in the plane strain</i>	3
<i>Veliyev F.E. Interaction of zones of weakened interparticle material bonds in isotropic medium under nonuniform stress field</i>	11
<i>Starovoitov E.I., Leonenko D.V., Zhuravkov M.A. The variable deformation of the three-layer rod by local sinusoidal load</i>	19

### Modelling of technological processes

<i>Malinin V.G., Mussaui Y.Y., Trifonov Ye.A. Martensitic inelasticity of alloy Ti-50Ni while defroming under complex trajectories by archimedes spiral: experimental results, mathematical model</i>	29
---	----

### Designing, calculations, materials

<i>Kolesnikov V.A., Vdovin S.I., Dorofeyev G.V., Tatarchenkov N.V., Dzhamts Ye.V. Experimental launcher for flexible pipe winding</i>	35
<i>Fedorov T.V., Morev P.G. An approximation of strain–stress curves, based on nonuniform rational b–spline (nurbs). practical implementation</i>	41

### Machine building technology and toolware

<i>Akhmetzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Effect of ultrasonic treatment on surface roughness parts obtained additive technology</i>	47
<i>Smolentsev Ye.V., Kadyrmetov A.M., Kondratyev M.V., Bobrov Ye.S. Optimization of process of application plasma hardening coating</i>	54
<i>Yemelyanov S.G., Malneva Yu.A., Kuts O.G. Appointment requirements for accuracy of metal instruments based on the establishment of mutual influence of main elements metalworking system for error treatment</i>	60
<i>Panayoti V.A. Analysis of the geometry of cutting surfaces relief cbn wheels for grinding of solid lubricant</i>	67
<i>Lavrinenko V.I., Skryabin V.A., Pasichmy O.O., Solod V.Yu., Sytnik A.A. Influence of properties of hard alloys on their workability diamond circles</i>	72
<i>Smolentsev V.P., Zolotarev V.V., Sukhochev G.A. Formation of surface layer results by combined treatment</i>	82
<i>Yamnikov A.S., Yamnikova O.A., Kiselyov A.V. Fixing error at console fixing of the thin-walled pipe preparation having initial ovality</i>	90
<i>Nosenko V.A., Avilov A.V., Ladygina O.M., Duma E.A. The morphology and chemical composition of the wears area of the silicon carbide after microcutting of tungsten with the speed 60 m/s</i>	97

### Instrument making and biotechnological system

<i>Shkatov P.N., Lisitsina I.O. A comparative study defendamerica electropotential probes with different the placement of electrodes</i>	105
<i>Zhidkov A.V., Zhiltsov M.P., Lupandin A.A., Vyun S.S., Loboda O.A., Mishin V.V., Podmasteryev K.V. Hardware–software complex for test hip joint with friction pair «metal–metal»</i>	111
<i>Korenevskiy N.A., Magerovskiy M.A., Shutkin A.N., Fedyanin V.I. Fuzzy models of professional orientation and assessment of training of athletes</i>	121
<i>Ivanov Yu.V., Raspopov V.Ya., Alaluev R.V. The pendulum sensor of the level with the electromagnetic damping for the control of the horizontality of the railway track</i>	127
<i>Kozlov A.S., Labkovckaya P.Ya., Tkalic V.L., Pirozhnikova O.I. Modeling the dynamics of electromechanical elements sensors control systems</i>	131

### Control, diagnostics, tests

<i>Dremin V.V., Dremina E.V., Zharkikh E.V., Potapova E.V., Alimicheva E.A., Masalygina G.I., Dunaev A.V. Possibilities application of combined methods of optical noninvasive diagnosis for tissue of lower limbs viability study in patients with diabetes</i>	136
<i>Gorina M.A., Gorbunova Ye.N., Gorin A.V. Controller flex leak</i>	143

## **ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

УДК 539.375

А.В. МАЛИК, Л.А. БЕЛАЯ, И.М. ЛАВИТ

### **О ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ТЕЛА С ТРЕЩИНОЙ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

*Задача о динамическом нагружении плоскодеформированного упругого тела с краевой трещиной решается методом прямых. Интегрирование по времени осуществляется по конечноразностной схеме Кранка–Николсон, по пространственной области – методом конечных элементов. Используется модель когезионной трещины Баренблатта. Плавность смыкания кромок трещины в ее кончике обеспечивается применением специальных конечных элементов. По рассчитанной скорости высвобождения энергии определяется, когда это возможно, коэффициент интенсивности напряжений. Результаты расчетов сопоставляются с данными экспериментов Кальтхоффа. Их удовлетворительное согласие свидетельствует об адекватности математической модели и об эффективности метода расчета.*

**Ключевые слова:** динамическое разрушение; трещина; силы сцепления; метод прямых; схема Кранка–Николсон; метод конечных элементов.

Среди задач динамической механики разрушения [1] наиболее простой и, по-видимому, наиболее важной является задача об определении условий старта трещины. При этом, какие бы критерии старта ни использовались, необходимо уметь вычислять коэффициенты интенсивности напряжений (КИН). В отличие от соответствующей квазистатической задачи, корневая асимптотика поля напряжений возникает не в начальный момент, что вносит существенные трудности в расчет КИН. Так, в частности, использование сингулярных конечных элементов, обычное при решении квазистатических задач, заведомо некорректно до момента образования корневой асимптотики. А так как результаты динамического расчета для быстропротекающих процессов нагружения могут заметно, иногда в разы, отличаться от результатов квазистатического расчета, погрешности метода расчета необходимо, по возможности, уменьшать. На это и направлен изложенный ниже метод, свободный от упомянутого принципиального недостатка.

В основу метода положена теория сил сцепления Баренблатта [2, 3]. Введение этих сил позволяет получать реалистическое, не имеющее сингулярности распределение напряжений в окрестности кончика трещины в течение всего процесса деформирования. Для исключения сингулярности поля напряжений, или, что то же самое, обеспечения плавного смыкания кромок трещины в ее кончике используются специальные конечные элементы, предложенные в работе [4] и примененные ранее для решения упругопластических задач механики разрушения [4, 5]. Метод позволяет для любого момента времени вычислить скорость высвобождения энергии при продвижении трещины и, если эта величина не отрицательна, рассчитать КИН.

Перейдем к изложению метода. Рассмотрим поперечное сечение упругого тела, находящегося в состоянии плоской деформации и ослабленного краевой прямолинейной трещиной нормального отрыва. При этом и сечение, и распределение поверхностной нагрузки (массовые силы отсутствуют) симметричны относительно оси абсцисс (рисунок 1).

Численное решение задачи получается на основе принципа возможных перемещений:

$$\int_S (\rho \partial_t \partial_t u_k \delta u_k + \sigma_{km} \delta \varepsilon_{km}) dS = \int_l p_k \delta u_k dl, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь области (рисунок 1);

$l$  – ее граничный контур;

$\rho$  – плотность материала;

$t$  – время;

$k, m = 1, 2$ ;

$u_k$  – вектор перемещений;

$\delta$  – символ вариации;

$\sigma_{km}$  – тензор напряжений;

$\varepsilon_{km}$  – тензор деформаций;

$p_k$  – распределенная нагрузка, приложенная к контуру (сосредоточенная нагрузка моделируется с помощью функции Дирака);

$\partial_t = \partial/\partial t$  – оператор дифференцирования по времени.

Пусть  $W$  – некоторый характерный линейный размер задачи. Отнесем все величины, имеющие размерность длины, к величине  $W$ , имеющие размерность площади – к величине  $W^2$ , имеющие размерность давления – к модулю Юнга  $E$ , имеющие размерность времени – к характерному времени  $T$ , определяемому формулой:

$$T = \frac{W}{\sqrt{E/\rho}}.$$

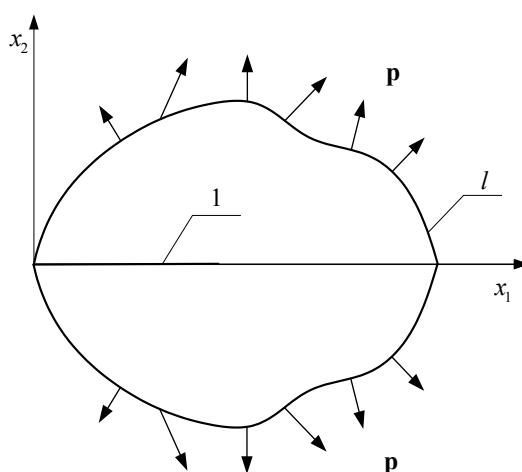


Рисунок 1 – Поперечное сечение тела:  $l$  – трещина

В безразмерных величинах уравнение (1) принимает вид:

$$\int_S (\partial_t \partial_t u_k \delta u_k + \sigma_{km} \delta \varepsilon_{km}) dS = \int_l p_k \delta u_k dl. \quad (2)$$

Это уравнение решается численным методом прямых [6]. Вначале уравнение (2) преобразуется в конечноразностное уравнение по времени. В данной работе используется неявная схема Кранка–Николсон [7].

Введем в рассмотрение поле скоростей, определенное как:

$$v_k = \partial_t u_k.$$

Уравнение (2) при этом оказывается эквивалентно системе двух уравнений первого порядка по времени:

$$\begin{cases} \int_S (\partial_t v_k \delta u_k + \sigma_{km} \delta \varepsilon_{km}) dS = \int_l p_k \delta u_k dl \\ v_k = \partial_t u_k \end{cases}. \quad (3)$$

Пусть, далее,  $\Delta t$  – величина шага интегрирования по времени,  $n = 1, 2, \dots$  – номер шага. Конечноразностное представление производной по времени на  $n$ -ом шаге имеет вид:

$$\partial_t y \approx \frac{y^n - y^{n-1}}{\Delta t}, \quad (4)$$

где  $y^n, y^{n-1}$  – значения  $y$  на границах временного интеграла.

Величины, не содержащие производных по времени, представляются на  $n$ -ом шаге интегрирования по времени в виде:

$$y \approx \frac{1}{2}(y^n + y^{n-1}). \quad (5)$$

С использованием формул (4), (5) конечноразностное представление системы (3) записывается в виде:

$$\begin{cases} \int_S \left[ \frac{v_k^n - v_k^{n-1}}{\Delta t} \delta u_k + \frac{1}{2} (\sigma_{km}^n + \sigma_{km}^{n-1}) \delta \varepsilon_{km} \right] dS = \frac{1}{2} \int_l (p_k^n + p_k^{n-1}) \delta u_k dl \\ \frac{u_k^n - u_k^{n-1}}{\Delta t} = \frac{1}{2} (v_k^n + v_k^{n-1}) \end{cases} \quad (6)$$

Величины с индексами  $n-1$  известны из решения для предыдущего шага. Из системы (6) определяются величины с индексами  $n$ .

Выразим из второго уравнения системы (6) величину  $v_k^n$  и подставим в первое уравнение. Получим:

$$v_k^n = \frac{2}{\Delta t} (u_k^n - u_k^{n-1}) - v_k^{n-1}, \quad (7)$$

$$\int_S \left[ \frac{4}{(\Delta t)^2} u_k^n \delta u_k + \sigma_{km}^n \delta \varepsilon_{km} \right] dS = \int_l (p_k^n + p_k^{n-1}) \delta u_k dl + \int_S \left[ \frac{4}{\Delta t} \left( \frac{u_k^{n-1}}{\Delta t} + v_k^{n-1} \right) \delta u_k - \sigma_{km}^{n-1} \delta \varepsilon_{km} \right] dS. \quad (8)$$

Система (6) распадается на два последовательно решаемых уравнения. Вначале из уравнения (8) определяются перемещения  $u_k^n$ , затем из уравнения (7) – скорости  $v_k^n$ .

Уравнение (8) представляет собой вариационное уравнение по пространственным переменным, которое необходимо решать на каждом шаге интегрирования по времени. Его решение находится методом конечных элементов [8].

В соответствии с работой [4] используются конечные элементы двух типов. Элементы первого типа – это обычные изопараметрические элементы [8], элементы второго типа – специальные элементы – обеспечивают плавное смыкание кромок трещины в ее кончике и, тем самым, отсутствие сингулярности полей напряжений и деформаций [2, 3]. Специальные элементы занимают ряд, прилегающий к трещине (рисунок 2). Этим достигается межэлементная непрерывность перемещений, как между специальными элементами, так и между специальными и обычными элементами [4].

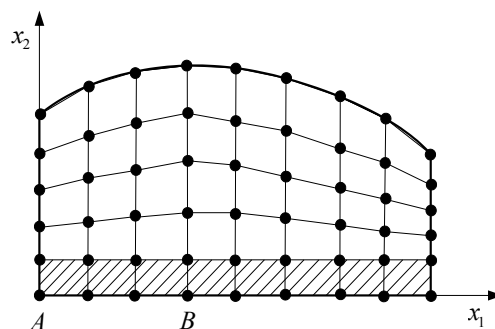


Рисунок 2 – Принцип построения конечноэлементной сетки:

Ось абсцисс – ось симметрии сечения.  $AB$  – трещина. Специальные элементы заштрихованы

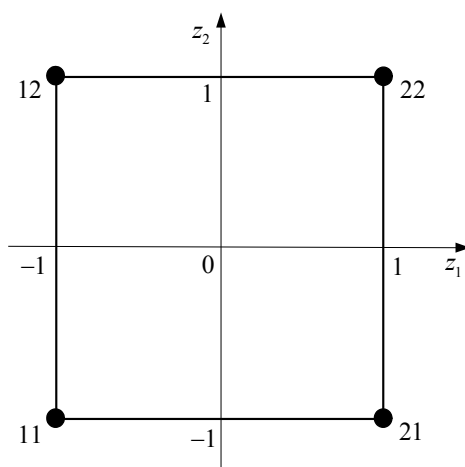
В локальных координатах [8] каждый конечный элемент, как обычный, так и специальный, представляет собой квадрат (рисунок 3).

Глобальные координаты точек элемента определяются формулой [8]:

$$x_m = L_i(z_1) L_j(z_2) X_m^{ij}; \quad i, j = 1, 2; \quad z_1, z_2 \in [-1; 1], \quad (9)$$

где  $X_m^{ij}$  – заданные глобальные декартовы координаты узлов (верхние индексы обозначают номер узла в локальной нумерации);

$L_i(z)$  – интерполяционные полиномы Лагранжа.



**Рисунок 3 – Конечный элемент в локальных координатах  $z_1, z_2$  – квадрат:**

Узлы имеют двойную нумерацию: первый индекс определяет положение узла по оси абсцисс, второй – по оси ординат

В данном случае:

$$L_1(z) = \frac{1}{2}(1-z); \quad L_2(z) = \frac{1}{2}(1+z).$$

В глобальных координатах обычные элементы представляют собой произвольные четырехугольники, но специальные элементы – всегда прямоугольники.

Перемещения точек обычного конечного элемента задаются в виде [8]:

$$u_m = L_i(z_1)L_j(z_2)U_m^{ij}, \quad (10)$$

где  $U_m^{ij}$  – узловые перемещения.

Перемещения точек специального конечного элемента определяются формулами [4]

$$\begin{aligned} u_1 &= L_i(z_1)L_j(z_2)U_1^{ij}; \\ u_2 &= H_i(z_1)L_1(z_2)U_2^{i1} + L_i(z_1)L_2(z_2)U_2^{i2} + \frac{1}{2}\Delta x_1 H_{i+2}(z_1)L_1(z_2)U_3^{i1}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\Delta x_1$  – размер элемента по оси абсцисс;

$U_3^{ij}$  – значения производной  $\partial u_2 / \partial x_1$  в  $ij$ -ом узле (эти величины определяются только для узлов, лежащих на оси абсцисс – прямой, на которой расположена трещина);

$H_m(z)$  – интерполяционные полиномы Эрмита, определяемые формулами [8]:

$$\begin{aligned} H_1(z) &= \frac{1}{4}(2-3z+z^3); \quad H_2(z) = \frac{1}{4}(2+3z-z^3); \\ H_3(z) &= \frac{1}{4}(1-z-z^2+z^3); \quad H_4(z) = \frac{1}{4}(-1-z+z^2+z^3). \end{aligned}$$

Подстановка формул (9) – (11) в выражения для деформаций:

$$\varepsilon_{km} = \frac{1}{2}(\partial_k u_m + \partial_m u_k) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_m}{\partial z_1} \frac{\partial z_1}{\partial x_k} + \frac{\partial u_m}{\partial z_2} \frac{\partial z_2}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial z_1} \frac{\partial z_1}{\partial x_m} + \frac{\partial u_k}{\partial z_2} \frac{\partial z_2}{\partial x_m} \right)$$

и напряжений:

$$\sigma_{km} = 3K\varepsilon_{km} + 2G(\varepsilon_{km} - \varepsilon\delta_{km}),$$

где  $\delta_{km}$  – символ Кронекера;

$\varepsilon$  – средняя деформация;

$K, G$  – объемный модуль и модуль сдвига, отнесенные к модулю Юнга ( $\nu$  – коэффициент Пуассона),

$$\delta_{km} = \begin{cases} 1, & k = m; \\ 0, & k \neq m; \end{cases} \quad \varepsilon = \frac{1}{3} \varepsilon_{km} \delta_{km}; \quad K = \frac{1}{3(1-2\nu)}; \quad G = \frac{1}{2(1+\nu)}$$

позволяет выразить все величины, входящие в уравнение (8), через известные функции с коэффициентами, линейно зависящими от узловых перемещений или их вариаций.

Далее применяется обычная конечноэлементная процедура, позволяющая свести решение поставленной задачи к решению системы линейных алгебраических уравнений [8]. Главные (кинематические) граничные условия (в рассматриваемом классе задач они могут быть только нулевыми) учитываются следующим образом [8]. Пусть  $j$  – номер узлового перемещения (в глобальной нумерации), которое должно быть равно нулю. Обнуляются  $j$  – ая строка и  $j$  –ый столбец матрицы коэффициентов разрешающей системы уравнений (последнее – для сохранения симметрии матрицы) за исключением диагонального элемента; обнуляется также  $j$  –ый элемент столбца свободных членов.

Кончик трещины обязательно должен совпадать с каким-либо узлом конечноэлементной сетки. В этом узле полагается не только  $u_2 = 0$ , но и  $\partial u_2 / \partial x_1 = 0$ , что обеспечивает плавность смыкания кромок трещины в ее кончике.

Для вычисления скорости высвобождения энергии при продвижении трещины используется более простой, чем в работе [4], и, как показывают сравнительные расчеты, более точный подход. Упомянутые граничные условия в кончике трещины представляют собой, с механической точки зрения, связи. Реакции этих связей,  $Q_B$  и  $M_B$  (рисунок 4) легко подсчитать, подставляя значения узловых перемещений в соответствующие непроброзованные уравнения разрешающей системы.

При продвижении трещины на длину конечного элемента  $\Delta x_1$  эти реакции связей уменьшаются (по модулю) до нуля, а соответствующие им перемещения  $u_2$  и угол поворота  $\partial u_2 / \partial x_1$  приобретают конечные значения.

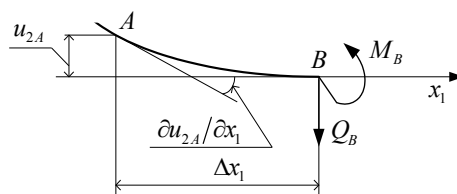


Рисунок 4 – Реакции связей и узловые перемещения в узлах конечного элемента, прилегающего к кончику трещины (узел B)

Предположим [2, 3], что при росте трещины конфигурация концевой области не изменяется. Это значит, что перемещения, которые получит узел B при продвижении трещины на величину  $\Delta x_1$ , будут равны перемещениям узла A при совпадении кончика трещины с узлом B. При этом величина высвобожденной энергии, отнесенная к приращению длины трещины  $\Delta x_1$ , определяется очевидной формулой:

$$J = -\frac{1}{\Delta x_1} \left( Q_B u_{2A} + M_B \frac{\partial u_{2A}}{\partial x_1} \right). \quad (12)$$

Формула (12) учитывает наличие у трещины двух кромок. Если величина  $J \geq 0$ , то по ней можно найти КИН [9]:

$$K_I = \sqrt{\frac{J}{1-\nu^2}}.$$

Для получения размерного значения КИН нужно эту величину умножить на  $E\sqrt{W}$ . Если из формулы (12) следует, что  $J < 0$ , то это значит, что корневая асимптотика еще не установилась.

В качестве примера приложения изложенного метода к моделированию динамического разрушения рассмотрим нагружение образца Шарпи (рисунок 5), экспериментально изученное Кальтхоффом [10].

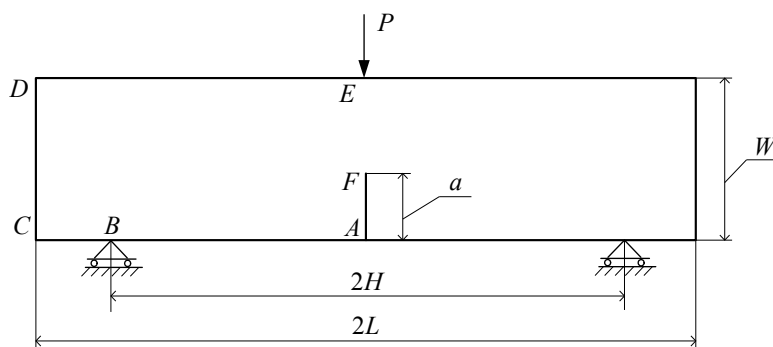


Рисунок 5 – Расчетная схема образца Шарпи

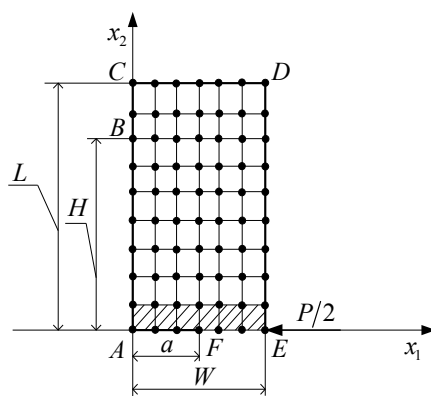


Рисунок 6 – Конечноэлементная сетка (принципиальная схема) математической модели образца Шарпи: Специальные конечные элементы заштрихованы

Материал образца – сталь с характеристиками (ниже все величины – размерные):  $E = 2.1 \cdot 10^5$  МПа;  $\nu = 0.3$ ;  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Размеры образца, мм:  $W = 60$ ;  $H = 120$ ;  $L = 165$ . Длина трещины  $a = 20$  мм.

Схема расчета методом конечных элементов (принципиальная) изображена на рисунке 6. Рассчитывается половина образца, разделенного по оси симметрии. Участки контура  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$ ,  $DE$ ,  $FA$  свободны от нагрузки. Перемещение  $u_1$  узла  $B$  полагается равным нулю (подвижная опора). К узлу  $E$  приложена сосредоточенная нагрузка  $P/2$ , направленная противоположно оси абсцисс. На участке  $EF$  заданы условия симметрии: равны нулю перемещение  $u_2$  и касательная нагрузка. Полагается также равной нулю производная  $\partial u_2 / \partial x_1$ , в том числе и в кончике трещины – узле  $F$ . Участок  $AF$  – линия трещины – свободен от нагрузки.

Расчет, результаты которого представлены на рисунке 7, проводился на конечноэлементной сетке при числе элементов по оси абсцисс  $n_1 = 100$  и числе элементов по оси ординат  $n_2 = 69$ . Для проверки точности решения рассчитывалась безразмерная величина:



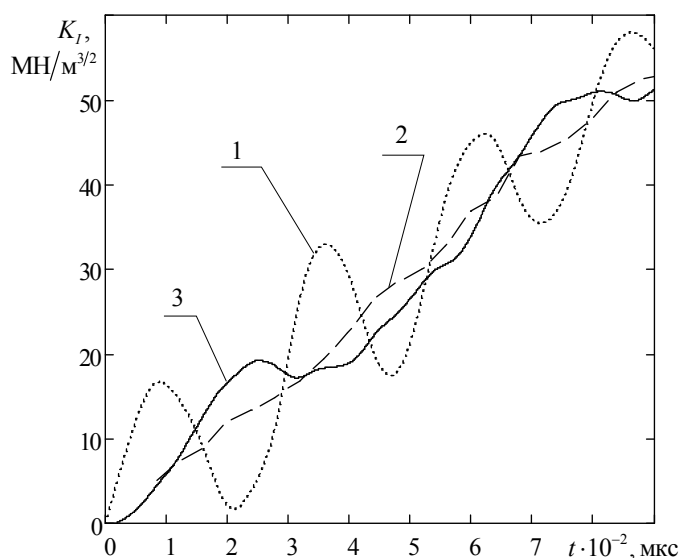
$$\lambda = \frac{K_I \sqrt{W}}{P}, \quad (13)$$

где  $P$  – значение сосредоточенной нагрузки, отнесенное к толщине образца – его размеру в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа.

Получена величина  $\lambda = 6.423$ , что незначительно отличается от значения, приведенного в работе [11]:  $\lambda = 6.606$ .

Динамический расчет выполнялся для отрезка времени  $T_m = 925$  мкс при 8002 шагах интегрирования по времени. Увеличение числа шагов не приводит к сколько-нибудь значительному изменению результатов расчета.

В работе [10] приведена зависимость  $K_I(t)$ , связанная с нагрузкой  $P(t)$  формулой (13). По этой зависимости при  $\lambda = 6.606$  определялась функция  $P(t)$  – часть исходных данных задачи.



**Рисунок 7 – Зависимость КИН от времени:**

1 – статическое решение [10]; 2 – экспериментальные результаты [10];  
3 – результаты расчета разработанным методом

Результаты расчета свидетельствуют о приемлемом согласии теории и эксперимента. Расхождение между ними может быть обусловлено как погрешностями расчета, так и экспериментального метода. Поэтому, с учетом сложности изучаемого явления, можно сделать вывод о приемлемой точности математической модели и предложенного метода расчета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Партон, В.З. Динамика хрупкого разрушения / В.З. Партон, В.Г. Борисковский. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. Баренблатт, Г.И. О равновесных трещинах, образующихся при хрупком разрушении. Прямолинейные трещины в плоских пластинках / Г.И. Баренблатт // ПММ. – 1959. – Т. 23. – Вып. 4. – С. 706–721.
3. Баренблатт, Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении / Г.И. Баренблатт // Журн. прикл. механики и техн. физики. – 1961. – № 4. – С. 3–56.
4. Лавит, И.М. Об устойчивом росте трещины в упругопластическом материале / И.М. Лавит // Проблемы прочности. – 1988. – № 7. – С. 18–23.
5. Лавит, И.М. Термоупругопластическая задача механики разрушения для полого цилиндра с внутренними трещинами / И.М. Лавит, Л.А. Толоконников // Прикл. проблемы прочности и пластичности. Методы решения. – Горький: Изд-во горьковского ун-та. – 1990. – С. 55–60.
6. Михлин, С.Г. Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений / С.Г. Михлин, Х.Л. Смолицкий. – М.: Наука, 1965. – 384 с.
7. Рихтмайер, Р.Д. Разностные методы решения краевых задач / Р.Д. Рихтмайер, К. Мортон. – М.: Мир, 1972. – 418 с.

8. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
9. Райс, Дж. Математические методы в механике разрушения / Дж. Райс // Разрушение. – М.: Мир. – 1975. – Т. 2. – С. 204–335.
10. Kalthoff, J.F. On the measurement of dynamic fracture toughnesses – a review of recent work / J.F. Kalthoff // Int. J. of Fracture. – 1985. – V. 27. – p. 277–298.
11. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. – М.: Мир, 1990. – Т. 1. – 448 с.

**Малик Александр Васильевич**  
Тульский государственный  
университет,  
кафедра математического  
моделирования  
Аспирант  
300012, Тула, просп. Ленина, 92  
Тел.: (84872)33–24–88  
E-mail: runer10@mail.ru

**Белая Лилия Александровна**  
Тульский государственный  
университет,  
кафедра математического  
моделирования  
Доцент  
300012, Тула, просп. Ленина, 92  
Тел.: (84872)33–24–88  
E-mail: bliliy@yandex.ru

**Лавит Игорь Михайлович**  
Тульский государственный  
университет,  
кафедра математического  
моделирования  
Профессор  
300012, Тула, просп. Ленина, 92  
Тел.: (84872)33–24–88  
E-mail: IgorLavit@yandex.ru

A.V. MALIK, L.A. BELAYA, I.M. LAVIT

## ON A DYNAMIC LOADING BODY WITH A CRACK IN THE PLANE STRAIN

*The problem of dynamic loading plane strain elastic body with an edge crack is solved by the method of lines. Integration over time is carried out with Crank–Nicholson finite–difference scheme. Space integration is executed with finite element method. Barenblatt cohesive crack model is used. The smooth closing of crack edges in crack tip is achieved by special finite elements use. The stress intensity factor is determined with calculated energy release rate, whenever possible. The results of calculations are compared with experimental data by Kalthoff. Their satisfactory agreement testifies on adequacy of the mathematical model and effectiveness of the computational approach.*

**Keywords:** dynamic fracture; crack; cohesive forces; method of lines; Crank–Nicholson scheme; finite element method.

## BIBLIOGRAPHY

1. Parton, V.Z. Dinamika khrupkogo razrusheniya / V.Z. Parton, V.G. Boriskovskiy. – М.: Mashinostroyeniye, 1988. – 240 s.
2. Barenblatt, G.I. O ravnoesnykh treshchinakh, obrazuyushchikhsya pri khrupkom razrushenii. Pryamolineynyye treshchiny v ploskikh plastinkakh / G.I. Barenblatt // PMM. – 1959. – Т. 23. – Вып. 4. – С. 706–721.
3. Barenblatt, G.I. Matematicheskaya teoriya ravnoesnykh treshchin, obrazuyushchikhsya pri khrupkom razrushenii / G.I. Barenblatt // Zhurn. prikl. mekhaniki i tekhn. fiziki. – 1961. – № 4. – С. 3–56.
4. Lavit, I.M. Ob ustoychivom roste treshchiny v uprugoplasticheskom materiale / I.M. Lavit // Problemy prochnosti. – 1988. – № 7. – С. 18–23.
5. Lavit, I.M. Termouprugoplasticheskaya zadacha mekhaniki razrusheniya dlya pologo tsilindra s vnutrennimi treshchinami / I.M. Lavit, L.A. Tolokonnikov // Prikl. problemy prochnosti i plastichnosti. Metody resheniya. – Gorkiy: Izd-vo gorkovskogo un-ta. – 1990. – С. 55–60.
6. Mikhlin, S.G. Priblizhennyye metody resheniya differentsialnykh i integralnykh uravneniy / S.G. Mikhlin, K.H.L. Smolitskiy. – М.: Nauka, 1965. – 384 s.
7. Rikhtmayyer, R.D. Raznostnyye metody resheniya krayevykh zadach / R.D. Rikhtmayyer, K. Morton. – М.: Mir, 1972. – 418 s.
8. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
9. Райс, Дж. Математические методы в механике разрушения / Дж. Райс // Разрушение. – М.: Мир. – 1975. – Т. 2. – С. 204–335.
10. Kalthoff, J.F. On the measurement of dynamic fracture toughnesses – a review of recent work / J.F. Kalthoff // Int. J. of Fracture. – 1985. – V. 27. – p. 277–298.
11. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. – М.: Мир, 1990. – Т. 1. – 448 с.

**Malik Alexander Vasilievich**  
Tula State University,  
department of mathematical modeling  
Postgraduate student  
300012, Tula, Lenin ave., 92  
Tel: (84872)33–24–42  
E-mail: runer10@mail.ru

**Belaya Liliya Aleksandrovna**  
Tula State University,  
department of mathematical modeling  
Associate professor  
300012, Tula, Lenin ave., 92  
Tel: (84872) 33–24–88  
E-mail: bliliy@yandex.ru

**Lavit Igor Mikhailovich**  
Tula State University,  
department of mathematical modeling  
Professor  
300012, Tula, Lenin ave., 92  
Tel: (84872) 33–24–88  
E-mail: IgorLavit@yandex.ru

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗОН ОСЛАБЛЕННЫХ МЕЖЧАСТИЧНЫХ СВЯЗЕЙ МАТЕРИАЛА В ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАПРЯЖЕННОМ ПОЛЕ

*Дается математическое описание расчетной модели трещинообразования в изотропной среде при неоднородном напряженном поле. Принята модель зон предразрушения со связями между берегами. Задача о взаимодействии зон ослабленных межчастичных связей материала в изотропной среде под действием неоднородного напряженного поля сводится к решению системы сингулярных интегральных уравнений. Найдены нормальные и касательные усилия в связях между берегами зон предразрушения, размеры зон предразрушения, предельные значения внешней нагрузки, при которой происходит зарождение трещины в среде.*

**Ключевые слова:** изотропная среда в неоднородном напряженном поле, зоны предразрушения со связями между берегами, силы сцепления, трещинообразование.

Процесс разрушения реальных материалов зависит от особенностей структуры материала, его химического состава, вида напряжения и других. В настоящее время известны различные механизмы зарождения трещины [1–4].

Исследования вопросов разрушения элементов конструкций имеет важное практическое значение.

Рассмотрим однородную изотропную среду. На бесконечности действуют напряжения, являющиеся полиномиальными функциями декартовых координат  $x$  и  $y$ .

По мере нагружения среды силовой нагрузкой в материале будут возникать зоны предразрушения, которые моделируются как области ослабленных межчастичных связей материала. Взаимодействие берегов этих зон моделируется [3, 5] путем введения между берегами зоны предразрушения связей, имеющих заданную диаграмму деформирования. Физическая природа таких связей и размеры зон предразрушения зависят от вида материала. Поскольку указанные зоны (прослойки) малы по сравнению с остальной частью среды, их можно мысленно удалить, заменив разрезами, поверхности которых взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала.

В исследуемом случае возникновение зародышевой трещины представляет собой процесс перехода области предразрушения в область разорванных связей между поверхностями материала.

Исследования возникновения областей с нарушенной структурой материала, показывают, что в начальной стадии зоны предразрушения представляют собой узкий вытянутый слой, а затем с ростом нагрузки внезапно появляется вторичная система зон, содержащих материал с частично нарушенными связями.

Пусть в среде имеется  $N$  прямолинейных зон предразрушения длиной  $2\ell_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ). В центрах зон предразрушения разместим начала локальных систем координат  $x_k O_k y_k$ , оси  $x_k$  которых совпадают с зоной предразрушения и образуют углы  $\alpha_k$  с осью  $x$ . Размеры зон предразрушения заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения задачи.

Для математического описания взаимодействия берегов зон предразрушения считается, что между ними имеются связи, закон деформирования которых задан. В работах [6–9] исследовались уравнения деформирования связей для различных материалов.

При действии внешних нагрузок на среду в связях, соединяющих берега зон предразрушения, будут возникать нормальные  $q_{y_k}(x_k)$  и касательные  $q_{x_k y_k}(x_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) усилия. Следовательно, к берегам зон предразрушения будут приложены нормальные и касательные напряжения, численно равные  $q_{y_k}(x_k)$  и  $q_{x_k y_k}(x_k)$  соответственно. Величины этих напряжений заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения краевой задачи механики разрушения.

Граничные условия в рассматриваемой задаче на берегах зон предразрушения с напряжениями, являющимися полиномиальными функциями декартовых координат  $x$  и  $y$  на

бесконечности имеют вид:

$$\sigma_{y_k} = q_{y_k}(x_k); \quad \tau_{x_k y_k} = q_{x_k y_k}(x_k) \quad \text{на } y_k = 0, \quad -\ell_k \leq x_k \leq \ell_k \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

Уравнения рассматриваемой задачи необходимо дополнить соотношениями, связывающими раскрытие берегов зон предразрушения и усилия в связях. Без потери общности эти соотношения представим в следующем виде:

$$(\nu_k^+ - \nu_k^-) - i(u_k^+ - u_k^-) = C(x_k, \sigma_k) [q_{y_k}(x_k) - i q_{x_k y_k}(x_k)], \quad (2)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N),$$

где функции  $C(x_k, \sigma_k)$  рассматриваются как эффективные податливости соответствующих связей, зависящие от натяжения связей;

$$\sigma_k = \sqrt{q_{y_k}^2 + q_{x_k y_k}^2} - \text{модуль вектора усилий в соответствующих связях};$$

$(\nu_k^+ - \nu_k^-)$  – нормальная,  $(u_k^+ - u_k^-)$  – касательная составляющие раскрытия берегов  $k$ -той зоны предразрушения.

Для определения значения внешней нагрузки, при котором происходит зарождение трещины, нужно постановку задачи дополнить условием (критерием) появления трещины (разрыва межчастичных связей материала). В качестве такого условия принимаем критерий критического раскрытия берегов зоны предразрушения:

$$|(\nu_k^+ - \nu_k^-) - i(u_k^+ - u_k^-)| = \delta_{cr}, \quad (3)$$

где  $\delta_{cr}$  – характеристика сопротивления материала среды трещинообразованию.

С помощью принципа суперпозиции напряженное состояние в среде с произвольной системой зон предразрушения со связями между берегами представим в виде суммы двух напряженных состояний:

$$\sigma_x = \sigma_x^0 + \sigma_x^1, \quad \sigma_y = \sigma_y^0 + \sigma_y^1, \quad \tau_{xy} = \tau_{xy}^0 + \tau_{xy}^1, \quad (4)$$

где  $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$  – компоненты тензора напряжений в сплошной среде без зон предразрушения, когда на бесконечности действуют напряжения, являющимися полиномиальными функциями декартовых координат  $x$  и  $y$ ;

$\sigma_x^1, \sigma_y^1, \tau_{xy}^1$  – компоненты тензора напряжений для среды с произвольной системой зон предразрушения с исчезающими на бесконечности напряжениями.

Для компонент напряжений  $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$  имеем:

$$\begin{aligned} \sigma_x^0 + \sigma_y^0 &= 2[\Phi_0(z) + \overline{\Phi_0(\bar{z})}], \quad z = x + iy; \\ \sigma_y^0 - \sigma_x^0 + 2i\tau_{xy}^0 &= \Phi_0(z) + \Omega_0(\bar{z}) + (z - \bar{z})\overline{\Phi_0'(\bar{z})}; \\ \Phi_0(z) &= A_0 z^m + A_1 z^{m-1} + A_2 z^{m-2} + \dots + A_m; \\ \Omega_0(z) &= B_0 z^m + B_1 z^{m-1} + B_2 z^{m-2} + \dots + B_m. \end{aligned} \quad (5)$$

Отметим, что функции (5) в зависимости от значений коэффициентов  $A_j$  и  $B_j$  ( $j = 0, 1, 2, \dots, m$ ) определяют напряженное состояние в среде без зон предразрушения.

С учетом формул (4) краевое условие (1) запишем в следующем виде:

$$\sigma_{y_k}^1 - i\tau_{x_k y_k}^1 = q_{y_k} - i q_{x_k y_k} - (\sigma_{y_k}^0 - i\tau_{x_k y_k}^0) \quad \text{на } y_k = 0, \quad -\ell_k \leq x_k \leq \ell_k \quad (6)$$

Напряжения  $\sigma_x^1, \sigma_y^1, \tau_{xy}^1$  и перемещения  $u_1, v_1$  выразим через две кусочно-аналитические функции  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$ .

Краевые условия задачи (1) с помощью формул Колосова–Мусхелишвили [10] можно записать в виде граничной задачи для отыскания комплексных потенциалов  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$ :

$$\Phi(t_k) + \overline{\Phi(t_k)} + t_k \overline{\Phi'(t_k)} + \overline{\Psi(t_k)} = q_{y_k}(t_k) - i q_{x_k y_k}(t_k) - (\sigma_{y_k}^0 - i\tau_{x_k y_k}^0) \quad (7)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N)$$

где  $t_k$  – аффикс точек берегов  $k$ -ой зоны предразрушения.

Комплексные потенциалы  $\Phi(z)$  и  $\Psi(z)$ , дающие решение граничной задачи (7) ищем в следующем виде:

$$\Phi(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \frac{g_k(t) dt}{t - z_k}; \quad (8)$$

$$\Psi(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^N e^{-2i\alpha_k} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} \left[ \frac{\overline{g_k(t)}}{t - z_k} - \frac{\overline{T_k} e^{i\alpha_k}}{(t - z_k)^2} g_k(t) \right] dt,$$

где  $T_k = te^{i\alpha_k} + z_k^0$ ;  $z_k = e^{-i\alpha_k}(z - z_k^0)$

$g_k(x_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) – искомые функции, характеризующие раскрытие берегов зон предразрушения:

$$g_k(x_k) = \frac{2\mu}{i(1+\kappa)} \frac{\partial}{\partial x} [u_k^+(x_k, 0) - u_k^-(x_k, 0) + i(v_k^+(x_k, 0) - v_k^-(x_k, 0))] \quad (9)$$

Определив по формуле:

$$\sigma_y - i\tau_{xy} = \Phi(z) + \overline{\Phi(z)} + z\overline{\Phi'(z)} + \overline{\Psi(z)}$$

напряжения на оси  $x_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) и подставив их в граничные условия (7), получим систему  $N$  сингулярных интегральных уравнений задачи в следующем виде:

$$\sum_{k=1}^N \int_{-\ell_k}^{\ell_k} [K_{nk}(t, x)g_k(t) + L_{nk}(t, x)\overline{g_k(t)}] dt = \quad (10)$$

$$= \pi [q_{y_k}(x) - iq_{x_k y_k}(x) - F_k(x)] \quad |x| < \ell_n \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

Здесь

$$K_{nk}(t, x) = \frac{e^{i\alpha_k}}{2} \left( \frac{1}{T_k - X_n} + \frac{e^{-2i\alpha_n}}{\overline{T_k} - \overline{X_n}} \right);$$

$$L_{nk}(t, x) = \frac{e^{-i\alpha_k}}{2} \left[ \frac{1}{\overline{T_k} - \overline{X_n}} - \frac{T_k - X_n}{(\overline{T_k} - \overline{X_n})^2} e^{-2i\alpha_n} \right],$$

$$X_n = xe^{i\alpha_n} + z_n^0; \quad F_k(x) = \sigma_{y_k}^0 - i\tau_{x_k y_k}^0$$

Ядра полученной системы уравнений (10) регулярны за исключением случая, когда  $n = k$ , в этом случае  $K_{nk}(t, x)$  переходит в сингулярное ядро Коши.

Систему (10) можно записать в следующем виде:

$$\int_{-\ell_k}^{\ell_k} \frac{g_n(t) dt}{t - x} + \sum_{k \neq n} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} [g_k(t)K_{nk}(t, x) + \overline{g_k(t)}L_{nk}(t, x)] dt = \quad (11)$$

$$= \pi [q_{x_n}(x) - iq_{x_n y_n}(x) - F_n(x)]; \quad |x| < \ell_n \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

К системе сингулярных интегральных уравнений (11) для внутренних зон предразрушения следует добавить дополнительные равенства, выражающие условие однозначности смещений при обходе контура зоны предразрушения:

$$\int_{-\ell_k}^{\ell_k} g_k(t) dt = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

Наиболее просто систему сингулярных интегральных уравнений (11) можно регуляризовать методом Карлемана–Векуа [11].

Используя формулу обращения интеграла типа Коши [11] и дополнительные условия (12) из (11), получаем систему интегральных уравнений Фредгольма второго рода:

$$g_n(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{\ell_n^2 - x^2}} \left\{ - \int_{-\ell_n}^{\ell_n} \frac{\sqrt{\ell_n^2 - t^2} F_n^*(t) dt}{t - x} + \right. \quad (13)$$

$$\left. + \sum_{k \neq n} \int_{-\ell_k}^{\ell_k} [g_k(t)M_{nk}(t, x) + \overline{g_k(t)}N_{nk}(t, x)] dt, \right.$$

$$\left. |x| < \ell_n \quad (n = 1, 2, \dots, N), \quad F_n^*(t) = q_{y_n} - iq_{x_n y_n} - F_n \right.$$

Здесь

$$M_{nk}(t, x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\ell_n}^{\ell_n} \frac{\sqrt{\ell_n^2 - \xi^2} K_{nk}(t, \xi)}{\xi - x} d\xi; \quad (14)$$

$$N_{nk}(t, x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\ell_n}^{\ell_n} \frac{\sqrt{\ell_n^2 - \xi^2} L_{nk}(t, \xi)}{\xi - x} d\xi$$

Выражения (14) представляют собой сингулярные интегралы с ядром Коши. Их можно вычислить в замкнутом виде.

Запишем их в удобной для интегрирования форме:

$$M_{nk}(t, x) = -\frac{e^{i\alpha_{kn}}}{2\pi} \int_{-\ell_n}^{\ell_n} \frac{\sqrt{\ell_n^2 - \xi^2}}{\xi - x} \left( \frac{1}{\xi - T_{nk}} + \frac{1}{\xi - \bar{T}_{nk}} \right) d\xi;$$

$$N_{nk}(t, x) = \frac{e^{i\alpha_{kn}}}{2\pi} \int_{-\ell_n}^{\ell_n} \frac{\sqrt{\ell_n^2 - \xi^2}}{\xi - x} \left( \frac{\xi - \bar{T}_{nk}}{(\xi - T_{nk})^2} - \frac{1}{\xi - T_{nk}} \right) d\xi,$$

где  $T_{nk} = e^{i\alpha_{nk}} [t - d_{nk} e^{i(\alpha_k - \beta_{nk})}]$ ;  $d_{nk} e^{i\beta_{nk}} = z_n^0 - z_k^0$ .

Используя значения следующих интегралов:

$$\int_{-\ell_n}^{\ell_n} \frac{\sqrt{\ell_n^2 - \xi^2} d\xi}{(\xi - x)(\xi - T_{nk})} = -\pi \left( 1 + \frac{\sqrt{T_{nk}^2 - \ell_n^2}}{x - T_{nk}} \right);$$

$$\int_{-\ell_n}^{\ell_n} \frac{\sqrt{\ell_n^2 - \xi^2} (\xi - \bar{T}_{nk}) d\xi}{(\xi - x)(\xi - T_{nk})^2} = \pi \left[ \frac{(\bar{T}_{nk} - T_{nk}) \sqrt{T_{nk}^2 - \ell_n^2}}{(x - T_{nk})^2} + \frac{\ell_n^2 - 2T_{nk}^2 + T_{nk} \bar{T}_{nk}}{(x - T_{nk}) \sqrt{T_{nk}^2 - \ell_n^2}} - 1 \right],$$

получаем:

$$M_{nk}(t, x) = \frac{e^{i\alpha_{kn}}}{2} \left( 2 + \frac{\sqrt{T_{nk}^2 - \ell_n^2}}{x - T_{nk}} + \frac{\sqrt{\bar{T}_{nk}^2 - \ell_n^2}}{x - \bar{T}_{nk}} \right); \quad (15)$$

$$N_{nk}(t, x) = \frac{1}{2} e^{i\alpha_{kn}} \frac{\bar{T}_{nk} - T_{nk}}{x - T_{nk}} \left( \frac{T_{nk}}{\sqrt{T_{nk}^2 - \ell_n^2}} + \frac{\sqrt{T_{nk}^2 - \ell_n^2}}{x - T_{nk}} \right).$$

В правые части системы интегральных уравнений входят неизвестные значения напряжений  $q_{y_k}(x_k)$  и  $q_{x_k y_k}(x_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ).

Если представить неизвестные функции  $g_k(x_k)$ , а также нагрузочную функцию  $F_k(x_k)$  в виде:

$$g_k(x_k) = v_k(x_k) - i u_k(x_k); \quad F_k(x_k) = \sigma_k^0(x_k) - i \tau_k^0(x_k), \quad (16)$$

то из системы  $N$  комплексных сингулярных интегральных уравнений после отделения действительных и мнимых частей получим для нахождения  $v_k(x_k)$  и  $u_k(x_k)$  систему  $2N$  действительных сингулярных интегральных уравнений. Используем процедуру алгебраизации системы сингулярных интегральных уравнений [12, 13]. Для этого приведем в системе (11) и в дополнительных условиях (12) все интервалы интегрирования к одному интервалу  $[-1, 1]$ . Сделаем замену переменных:

$$t = \ell_n \tau; \quad x = \ell_n \eta \quad (|t| < \ell_n, |x| < \ell_n)$$

Система сингулярных интегральных уравнений (11) и дополнительные условия (12) запишутся в виде:

$$\int_{-1}^1 \frac{g_n(\tau) d\tau}{\tau - \eta} + \sum_{k \neq n} \ell_k \int_{-1}^1 [g_k(\tau) K_{nk}(\ell_k \tau, \ell_n \eta) + \overline{g_k(\tau)} L_{nk}(\ell_k \tau, \ell_n \eta)] d\tau = \quad (17)$$

$$= \pi F_n^*(\eta) \quad |\eta| < 1 \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

$$\int_{-1}^1 g_n(\tau) d\tau = 0,$$

Для неизвестных функций  $g_n(\tau)$  и свободных членов  $F_n^*(\eta)$  сохранены прежние обозначения.

Решение системы (17) представим в виде [12, 13]:

$$g_n(\eta) = \frac{g_n^0(\eta)}{\sqrt{1-\eta^2}}, \quad (18)$$

где  $g_n^0(\eta)$  – новая неизвестная функция, регулярная в интервале  $[-1, 1]$ .

Использование квадратурных формул типа Гаусса–Чебышева для сингулярного интеграла позволяет свести систему сингулярных интегральных уравнений (17) при дополнительных условиях к конечной системе  $N \times M$  алгебраических уравнений для определения  $N \times M$  неизвестных  $g_n^0(t_m) = v_n(t_m) - iu_n(t_m)$ :

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^N \ell_k \left[ g_k^0(t_m) K_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r) + \overline{g_k^0(t_m)} L_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r) \right] = F_n^*(x_r) \quad (r=1, 2, \dots, M-1) \quad (19)$$

$$\sum_{m=1}^M g_n^0(t_m) = 0 \quad (n=1, 2, \dots, N)$$

Здесь значения  $t_m$  и  $x_r$  определяются формулами:

$$t_m = \cos \frac{2m-1}{2M} \pi \quad (m=1, 2, \dots, M); \quad x_r = \cos \frac{\pi r}{M} \quad (r=1, 2, \dots, M-1)$$

Если перейти в (19) к сопряженным значениям, получаем еще  $N \times M$  алгебраических уравнений.

В правые части системы (19) входят неизвестные значения нормальных  $q_{y_k}(x_r)$  и касательных  $q_{x_k y_k}(x_r)$  усилий в узловых точках зон предразрушения.

Условиями, определяющими неизвестные напряжения в связях между берегами зон предразрушения, являются дополнительные уравнения (2).

В рассматриваемой задаче эти дополнительные условия удобнее записать для производной раскрытия берегов зон предразрушения:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} [v_k^+(x_k, 0) - v_k^-(x_k, 0) - i(u_k^+(x_k, 0) - u_k^-(x_k, 0))] = \frac{\partial}{\partial x_k} [C(x_k, \sigma_k)(q_{y_k}(x_k) - i q_{x_k y_k}(x_k))]$$

Используя полученное решение, можно записать:

$$g_k(x) = \frac{2\mu}{1+\kappa} \frac{\partial}{\partial x_k} [C(x_k, \sigma_k)(q_{y_k}(x_k) - i q_{x_k y_k}(x_k))], \quad (20)$$

где  $x_k$  – аффикс точек берегов  $k$ -ой зоны предразрушения.

Эти комплексные уравнения служат для определения неизвестных усилий  $q_{y_k}$  и  $q_{x_k y_k}$  в связях между берегами зон предразрушения. Для левой части соотношения (20) имеем:

$$(v_k^+ - v_k^-) - i(u_k^+ - u_k^-) = -\frac{1+\kappa}{2\mu} \int_{-\ell_k}^{x_k} g_k(x_k) dx_k \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (21)$$

С учетом (2) соотношение (21) принимает следующий вид:

$$-\frac{1+\kappa}{2\mu} \int_{-\ell_k}^{x_k} g_k(x_k) dx_k = C(x_k, \sigma_k) [q_{y_k}(x_k) - i q_{x_k y_k}(x_k)] \quad (22)$$

Отделяя в (22) действительные и мнимые части, получим:

$$-\frac{1+\kappa}{2\mu} \int_{-\ell_k}^{x_k} v_k(x_k) dx_k = C(x_k, \sigma_k) q_{y_k}(x_k) \quad (23)$$

$$-\frac{1+\kappa}{2\mu} \int_{-\ell_k}^{x_k} u_k(x_k) dx_k = C(x_k, \sigma_k) q_{x_k y_k}(x_k) \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (24)$$

Для построения недостающих уравнений, служащих для определения усилий в связях между берегами зон предразрушения, потребуем выполнения условий (23) – (24) в узловых точках  $t_m$ , содержащихся в зонах предразрушения. В результате получим еще  $2 \times N$  систем из  $M$  уравнений каждая для определения приближенных значений  $q_{y_k}(t_m)$  и  $q_{x_k y_k}(t_m)$  ( $k=1, 2, \dots, N$ ;  $m=1, 2, \dots, M$ ):

$$\begin{cases} C_0 v_k^0(t_1) = C(t_1, \sigma(t_1)) q_{y_k}(t_1), \\ C_0 (v_k^0(t_1) + v_k^0(t_2)) = C(t_2, \sigma(t_2)) q_{y_k}(t_2) \\ \dots \\ C_0 \sum_{m=1}^M v_k^0(t_m) = C(t_M, \sigma(t_M)) q_{y_k}(t_M) \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (25)$$

$$\begin{cases} C_0 u_k^0(t_1) = C(t_1, \sigma(t_1)) q_{x_k y_k}(t_1), \\ C_0 (u_k^0(t_1) + u_k^0(t_2)) = C(t_2, \sigma(t_2)) q_{x_k y_k}(t_2) \\ \dots \\ C_0 \sum_{m=1}^M u_k^0(t_m) = C(t_M, \sigma(t_M)) q_{x_k y_k}(t_M) \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, N) \quad (26)$$

где  $C_0 = -\frac{1+\kappa}{2\mu} \frac{\pi \ell_k}{M}$ .

Полученные системы (19) и (25), (26) оказались связанными и должны решаться совместно. Для замкнутости полученных систем не хватает  $2 \times N$  комплексных уравнений, определяющих размеры зон предразрушения. Так как напряжения в среде ограничены, то решение сингулярных интегральных уравнений должно искажаться в классе всюду ограниченных функций. Такое решение существует при выполнении условий разрешимости сингулярных интегральных уравнений. Поэтому полученные алгебраические системы не являются пока замкнутыми. Записывая условия конечности напряжений у вершин зон предразрушения (условия разрешимости), находим еще  $2 \times N$  комплексных уравнений:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^M (-1)^m g_n^0(t_m) \operatorname{ctg} \frac{2m-1}{4M} \pi &= 0 \quad (n=1, 2, \dots, N); \\ \sum_{m=1}^M (-1)^{m+M} g_n^0(t_m) \operatorname{tg} \frac{2m-1}{4M} \pi &= 0 \end{aligned} \quad (27)$$

Для определения предельного состояния, при котором возникает трещина, используем критическое условие (3). Тогда условием, определяющим предельное значение внешней нагрузки, будет равенство:

$$V(x_k^0) = \sqrt{[u^+(x_k^0, 0) - u^-(x_k^0, 0)]^2 + [v^+(x_k^0, 0) - v^-(x_k^0, 0)]^2} = \delta_{cr} \quad (28)$$

Модуль вектора смещения на берегах зон предразрушения при  $x_k = x_k^0$  удобно представить в виде:

$$\begin{aligned} V(x_k^0) = V_k^0 &= \frac{1+\kappa}{2\mu} \cdot \frac{\pi \ell}{M} \sqrt{A^2 + B^2}, \quad (k=1, 2, \dots, N) \\ A &= \sum_{m=1}^{M_{1k}} v_k^0(t_m); \quad B = \sum_{m=1}^{M_{1k}} u_k^0(t_m) \end{aligned} \quad (29)$$

где  $M_{1k}$  – число узловых точек, содержащихся в интервале  $(-\ell_k, x_k^0)$ .

Полученная алгебраическая система (19), (25) – (26) из-за неизвестных размеров зон предразрушения является нелинейной. Совместное решение полученных алгебраических систем дает возможность (при заданных характеристиках связей) найти напряженно-деформированное состояние среды, критическую внешнюю нагрузку, усилия в связях между



берегами зон предразрушения, размеры зон предразрушения для предельно–равновесного состояния среды, когда возникает трещина.

Объединенная алгебраическая система уравнений даже при линейно–упругих связях из–за неизвестных величин  $\ell_k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) оказывается нелинейной. Для ее решения использовали метод последовательных приближений [12], суть которого состоит в следующем. Решаем алгебраическую систему (19), (25) – (26) при некоторых определенных значениях  $\ell_k^*$  относительно остальных неизвестных. Остальные неизвестные входят в объединенную систему линейным образом. Значения  $\ell_k^*$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) и соответствующие им значения остальных неизвестных не будут, вообще говоря, удовлетворять уравнениям (27). Поэтому, подбирая значения параметров  $\ell_k^*$ , будем многократно повторять вычисления до тех пор, пока уравнения (27) не будут удовлетворяться с заданной точностью.

В каждом приближении алгебраическая система решалась методом Гаусса с выбором главного элемента. В случае нелинейного закона деформирования связей для нахождения усилий в зонах предразрушения используется итерационный метод, подобный методу упругих решений [14]. Принято, что закон деформирования межчастичных связей в зонах предразрушения линейный при  $V_k^0 \leq V_*$ .

Первый шаг итерационного процесса вычислений состоит в решении системы алгебраических уравнений для линейно–упругих связей. Следующие итерации выполняются только в случае, если на части зоны предразрушения имеет место неравенство  $V_k(x_k) > V_*$ . Для таких итераций решалась система алгебраических уравнений для квазиупругих связей с эффективной податливостью, переменной вдоль зоны предразрушения и зависящей от величины модуля вектора усилий в соответствующих связях, полученного на предыдущем шаге расчета. Расчет эффективной податливости проводится подобно нахождению текущего модуля в методе переменных параметров упругости [15]. Считается, что процесс последовательных приближений заканчивается, когда усилия в зонах предразрушения, полученные на двух последовательных шагах, мало отличаются.

Нелинейная часть кривой деформирования связей представлялась в форме билинейной зависимостью [6], восходящий участок которой соответствовал упругому деформированию связей ( $0 < V(x_k) \leq V_*$ ) с максимальным натяжением связей. При  $V(x_k) > V_*$  закон деформирования описывался нелинейной зависимостью, определяемой точками  $(V_*, \sigma_*)$  и  $(\delta_{cr}, \sigma_c)$ . Причем, при  $\sigma_c \geq \sigma_*$  имеем возрастающую линейную зависимость (линейное упрочнение, соответствующее упругопластической деформации связей).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин, В.А. Избранные нелинейные задачи механики разрушения / В.А. Левин, Е.М. Морозов, Ю.Г. Матвиенко – М.: Физматлит, 2004. – 408 с.
2. Мирсалимов, В.М. Зарождение дефекта типа трещины во втулке контактной пары / В.М. Мирсалимов // Мат. моделирование. – 2005. – Т. 17. – № 2. – С. 35–45.
3. Мирсалимов, В.М. К решению задачи механики контактного разрушения о зарождении и развитии трещины со связями между берегами во втулке фрикционной пары / В.М. Мирсалимов // Прикл. математика и механика. – 2007. – Т. 71. – Вып. 1. – С. 132–151.
4. Панасюк, В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В.В. Панасюк – Киев: Наукова думка, 1991. – 416 с.
5. Мир–Салим–заде, М.В. Зарождение трещин в перфорированной подкрепленной пластине / М.В. Мир–Салим–заде // Прикл. мех. и техн. физика. – 2008. – Т. 49. – № 6. – С. 170–180.
6. Гольдштейн, Р.В. Моделирование трещиностойкости композиционных материалов / Р.В. Гольдштейн, Перельмутер М.Н. // Вычисл. механика сплош. сред. – 2009. – Т. 2. – № 2. – С. 22–39.
7. Cox, B.N. Concepts for bridged cracks fracture and fatigue / B.N. Cox, D.B. Marshall // Acta Metallurgica et Materialia. – 1994. – Vol. 42. – № 2. – P. 341–363.
8. Ji, H. Adhesion via connector molecules: The many–stitch problem / H. Ji, P.G. de Genes // Macromolecules. – 1993. – Vol. 26. – P. 520–525.
9. The special issue: Cohesive models // Engineering Fracture Mechanics. – 2003. – Vol. 70. – № 14. – P. 1741–1987.
10. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н.И. Мухелишвили – М.: Наука, 1966. – 707 с.
11. Гахов, Ф.Д. Краевые задачи / Ф.Д. Гахов – М.: Наука, 1977. – 640 с.

12. Мирсалимов, В.М. Неодномерные упругопластические задачи / В.М. Мирсалимов. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
13. Ladopoulos, E.G. Singular Integral Equations, Linear and Non-Linear Theory and its Applications in Science and Engineering / E.G. Ladopoulos – Berlin: Springer Verlag, 2000. – 553 p.
14. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин – М.: Логос, 2003. – 376 с.
15. Биргер, И.А. Общие алгоритмы решения задач теорий упругости, пластичности и ползучести / И.А. Биргер // Успехи механики деформируемых сред. – М.: Наука. – 1975. – С. 51–73.

**Велиев Фарид Эльхан оглы**

Институт Математики и Механики НАН Азербайджана, Азербайджан, г. Баку

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник

E-mail: iske@mail.ru

F.E. VELIYEV

## INTERACTION OF ZONES OF WEAKENED INTERPARTICLE MATERIAL BONDS IN ISOTROPIC MEDIUM UNDER NONUNIFORM STRESS FIELD

*A mathematical description of calculation model for cracking in an isotropic medium under a nonuniform stress field was given. The model of zones of prefracture with bonds between the faces was adopted. The problem of interaction of the zones of weakened interparticle material bonds in an isotropic medium under influence of an inhomogeneous stress field was reduced to a system of singular integral equations. Normal and tangential forces in the bonds between the faces of prefracture zones, size of the prefracture zones and limit value of external load at which the nucleation of cracks in the medium occurs were found.*

**Keywords:** isotropic medium in nonuniform stress field, prefracture zone with bonds between faces, cohesive forces, cracking.

## BIBLIOGRAPHY

1. Levin, V.A. Izbrannyye nelineynyye zadachi mekhaniki razrusheniya / V.A. Levin, Ye.M. Morozov, YU.G. Matviyenko – М.: Fizmatlit, 2004. – 408 s.
2. Mirsalimov, V.M. Zarozhdeniye defekta tipa treshchiny vo vtulke kontaktной pary / V.M. Mirsalimov // Mat. modelirovaniye. – 2005. – T. 17. – № 2. – С. 35–45.
3. Mirsalimov, V.M. K resheniyu zadachi mekhaniki kontaktного razrusheniya o zarozhdenii i razvitiitreshchiny so svyazyami mezhduberegami vo vtulke friktsionной pary / V.M. Mirsalimov // Prikl. matematika i mekhanika. – 2007. – T. 71. – Vyp. 1. – С. 132–151.
4. Panasyuk, V.V. Mekhanika kvazikhrupkogo razrusheniya materialov / V.V. Panasyuk – Kiyev: Naukova dumka, 1991. – 416 s.
5. Mir-Salim-zade, M.V. Zarozhdeniye treshchin v perforirovannoy podkreplennoy plastine / M.V. Mir-Salim-zade // Prikl. mekh. i tekhn. fizika. – 2008. – T. 49. – № 6. – С. 170–180.
6. Goldshteyn, R.V. Modelirovaniye treshchinostoykosti kompozitsionnykh materialov / R.V. Goldshteyn, Perelmutter M.N. // Vychisl. mekhanika splosh. sred. – 2009. – T. 2. – № 2. – С. 22–39.
7. Cox, B.N. Concepts for bridged cracks fracture and fatigue / B.N. Cox, D.B. Marshall // Acta Metallurgica et Materialia. – 1994. – Vol. 42. – № 2. – P. 341–363.
8. Ji, H. Adhesion via connector molecules: The many-stitch problem / H. Ji, P.G. de Genes // Macromolecules. – 1993. – Vol. 26. – P. 520–525.
9. The special issue: Cohesive models // Engineering Fracture Mechanics. – 2003. – Vol. 70. – № 14. – P. 1741–1987.
10. Muskhelishvili, N.I. Nekotoryye osnovnyye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti / N.I. Muskhelishvili – М.: Nauka, 1966. – 707 s.
11. Gakhov, F.D. Krayevyye zadachi / F.D. Gakhov – М.: Nauka, 1977. – 640 s.
12. Mirsalimov, V.M. Neodnomernyye uprugoplasticheskiye zadachi / V.M. Mirsalimov. – М.: Nauka, 1987. – 256 s.
13. Ladopoulos, E.G. Singular Integral Equations, Linear and Non-Linear Theory and its Applications in Science and Engineering / E.G. Ladopoulos – Berlin: Springer Verlag, 2000. – 553 p.
14. Ilyushin, A.A. Plastichnost / A.A. Ilyushin – М.: Logos, 2003. – 376 s.
15. Birger, I.A. Obshchiye algoritmy resheniya zadach teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti / I.A. Birger // Uspekhi mekhaniki deformiruyemykh sred. – М.: Nauka. – 1975. – С. 51–73.

**Farid Valiyev Elkhan oglu**

Institute of Mathematics and Mechanics of NAS of Azerbaijan, Azerbaijan, Baku

Candidate of Ph. & Math. Sciences, Researcher

E-mail: iske@mail.ru

Э.И. СТАРОВОЙТОВ, Д.В. ЛЕОНЕНКО, М.А. ЖУРАВКОВ

## ПЕРЕМЕННОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНОГО СТЕРЖНЯ ЛОКАЛЬНОЙ СИНУСОИДАЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

*Рассмотрено деформирование трехслойного стержня с упругопластическими несущими слоями при переменном нагружении под действием синусоидальных нагрузок. Для описания кинематики несимметричного по толщине пакета стержня приняты гипотезы ломаной нормали. Предложена методика решения соответствующих краевых задач. Получены аналитические решения задач теории малых упругопластических деформаций при прямом и обратном нагружениях. Проведен численный анализ решений.*

**Ключевые слова:** знакопеременное нагружение, упругопластичность, трехслойный стержень, синусоидальная нагрузка.

В последнее время значительное распространение получили трехслойные элементы конструкций, которые состоят из двух несущих слоев и заполнителя, обеспечивающего их совместную работу. В условиях деформации изгиба эти конструкции оказываются наиболее рациональными, то есть близкими оптимальным с точки зрения обеспечения минимума весовых показателей при заданных ограничениях на прочность и жесткость. Они широко применяются в современных отраслях промышленности, что обуславливает необходимость разработки методов их расчета. В монографиях [1–4] рассматриваются различные математические модели и кинематические гипотезы слоистых, как правило упругих, элементов конструкций, приведены постановки краевых задач, изложены методы их расчета. Статьи [5–9] посвящены исследованию квазистатического деформирования однородных и композитных элементов конструкций при различных силовых и тепловых воздействиях. Динамическое поведение трехслойных стержней и пластин рассмотрено в работах [10, 11]. Исследование напряженно-деформированного состояния двухслойных металлополимерных пластин при циклических нагружениях проведено в статье [12].

Здесь, в рамках теории малых упругопластических деформаций [13, 14], рассмотрено знакопеременное нагружение несимметричного по толщине трехслойного стержня с упругопластическими несущими слоями и физически нелинейно-упругим заполнителем под действием локальной синусоидальной нагрузки. Численные результаты получены для металлополимерного стержня.

**Нагружение из естественного состояния.** Рассматривается деформирование несимметричного по толщине трехслойного стержня, несущие слои которого выполнены из упругопластического материала, а несжимаемый по толщине заполнитель – нелинейно-упругий. Система координат  $x, y, z$  связывается со срединной плоскостью заполнителя (рисунок 1). Принимается, что в тонких несущих слоях 1, 2 справедливы гипотезы Бернулли, в жестком несжимаемом по толщине сравнительно толстом заполнителе 3 нормаль остается прямой, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый дополнительный угол  $\psi'(x)$ .

На внешний слой стержня действует поверхностная силовая нагрузка  $q'(x)$ , при этом соответствующие траектории нагружения относятся к классу простых [13], через  $w'(x)$  и  $u'(x)$  обозначены прогиб и продольное перемещение срединной плоскости заполнителя (штрих вверх здесь и в дальнейшем соответствует нагружению из естественного состояния). На торцах предполагается наличие жестких диафрагм, препятствующих относительному сдвигу слоев, на границах слоев – склейки. С помощью введенных гипотез, продольные перемещения в слоях  $u^{(k)}$  выражаются через три искомые функции  $u'(x)$ ,  $\psi'(x)$  и  $w'(x)$ :

$$\begin{aligned} u^{(1)} &= u' + c\psi' - zw'_{,x} \quad (c \leq z \leq c+h_1), \quad u^{(3)} = u' + z\psi' - zw'_{,x} \quad (-c \leq z \leq c), \\ u^{(2)} &= u' - c\psi' - zw'_{,x} \quad (-c-h_2 \leq z \leq -c), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $z$  – координата рассматриваемого волокна; запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате;

$h_1, h_2, h_3 = 2c$  – толщины слоев;

верхний индекс  $k$  – номер слоя.

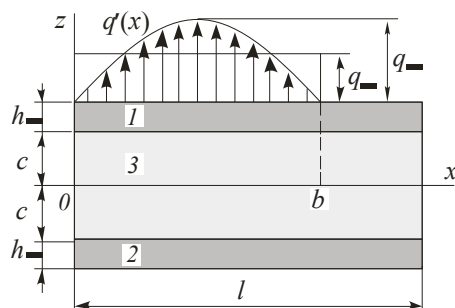


Рисунок 1 – Схема нагружения трехслойного стержня

Деформации в стержне следуют из перемещений (1) и соотношений Коши [3]. Введем обобщенные внутренние усилия и моменты в стержне:

$$N' = \sum_{k=1}^3 N'^{(k)} = \sum_{k=1}^3 \int_h \sigma'_{xx} dz, \quad M' = \sum_{k=1}^3 M'^{(k)} = \sum_{k=1}^3 \int_h \sigma'_{xx} z dz, \quad Q' = \int_h \sigma'_{xz} dz, \quad (2)$$

где  $\sigma'_{ij}{}^{(k)}$  – компоненты тензора напряжений в  $k$ -м слое на первом полуцикле нагружения.

В несущих слоях используются физические соотношения теории малых упругопластических деформаций Ильюшина [13]:

$$s'_{ij}{}^{(k)} = 2G_k f'^{(k)}(\epsilon'_u{}^{(k)}) \epsilon'_{ij}{}^{(k)}, \quad \sigma'_{ij}{}^{(k)} = 3K_k \epsilon'_{ij}{}^{(k)} \quad (k=1, 2; \quad i, j=x, y, z). \quad (3)$$

где  $s'_{ij}{}^{(k)}, \epsilon'_{ij}{}^{(k)}$  – девиаторы напряжений и деформаций;

$\sigma'_{ij}{}^{(k)}, \epsilon'_{ij}{}^{(k)}$  – шаровые части тензоров напряжений и деформаций;

$G_k, K_k$  – модули сдвига и объемного деформирования материалов слоев;

$$f'^{(k)}(\epsilon'_u{}^{(k)}) = \begin{cases} 1, & \epsilon'_u{}^{(k)} \leq \epsilon'_y{}^{(k)}, \\ 1 - \omega'^{(k)}(\epsilon'_u{}^{(k)}), & \epsilon'_u{}^{(k)} > \epsilon'_y{}^{(k)}, \end{cases}$$

$\omega'^{(k)}$  – функция пластичности Ильюшина в несущих слоях при нагружении из естественного состояния, например, для металлов ее можно принять в виде:

$$\omega'^{(k)}(\epsilon'_u) = \begin{cases} 0, & \epsilon'_u \leq \epsilon'_y; \\ A_0 \left(1 - \frac{\epsilon'_y}{\epsilon'_u}\right)^{\alpha_0}, & \epsilon'_u \geq \epsilon'_y, \end{cases} \quad (4)$$

$\epsilon'_u{}^{(k)}$  – интенсивность деформаций;

$\epsilon'_y{}^{(k)}$  – деформационный предел текучести материала;

$A_0, \alpha_0$  – экспериментальные константы материала, значения которых для некоторых материалов приведены в [3].

Для физически нелинейного заполнителя вводятся подобные уравнения состояния:

$$s'^{(3)}_{ij} = 2G_k (1 - \omega'^{(3)}(\epsilon'^{(3)}_u)) \epsilon'^{(3)}_{ij}, \quad \sigma'^{(3)}_{ij} = 3K_k \epsilon'^{(3)}_{ij} \quad (i, j=x, y, z), \quad (5)$$

где  $\omega'^{(3)}(\epsilon'^{(3)}_u)$  – универсальная функция физической нелинейности заполнителя, принимается по типу (4).

Компоненты тензора напряжений в слоях, используя (3), (5) представим через девиатор и шаровую часть тензора деформаций:

$$\sigma'_{xx}{}^{(k)} = s'_{xx}{}^{(k)} + \sigma'_{xx}{}^{(k)} = 2G_k \epsilon'_{xx}{}^{(k)} + 3K_k \epsilon'_{xx}{}^{(k)} - 2G_k \epsilon'_{xx}{}^{(k)} \omega'^{(k)},$$

$$\sigma'_{xz}(3) = s'_{xz}(3) = 2G_3 \vartheta'_{xz}(3) - 2G_3 \vartheta'_{xz}(3) \omega'(3). \quad (6)$$

Выделим в компонентах тензора напряжений (6) упругие (индекс «e») и неупругие (индекс «ω») слагаемые:

$$\sigma'_{xx}(k) = \sigma'_{xx}(k)e - \sigma'_{xx}(k)\omega, \quad \sigma'_{xz}(3) = \sigma'_{xz}(3)e - \sigma'_{xz}(3)\omega, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma'_{xx}(k)e &= 2G_k \vartheta'_{xx}(k) + 3K_k \varepsilon'_{xx}(k), & \sigma'_{xx}(k)\omega &= 2G_k \vartheta'_{xx}(k) \omega'(k), \\ \sigma'_{xz}(3)e &= 2G_3 \vartheta'_{xz}(3), & \sigma'_{xz}(3)\omega &= 2G_3 \vartheta'_{xz}(3) \omega'(3). \end{aligned}$$

Проведя подобную операцию с внутренними усилиями (2), получим:

$$N^{(k)} = N^{(k)e} - N^{(k)\omega}, \quad M^{(k)} = M^{(k)e} - M^{(k)\omega}, \quad Q^{(3)} = Q^{(3)e} - Q^{(3)\omega}. \quad (8)$$

Упругие (индекс «e») и неупругие (индекс «ω») составляющие усилий в (8) вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} N^{(k)e} &= b_0 \int \sigma'_{xx}(k)e dz, & N^{(k)\omega} &= b_0 \int \sigma'_{xx}(k)\omega dz, & M^{(k)e} &= b_0 \int \sigma'_{xx}(k)e z dz, & M^{(k)\omega} &= b_0 \int \sigma'_{xx}(k)\omega z dz, \\ Q^{(3)e} &= b_0 \int \sigma'_{xz}(3)e dz, & Q^{(3)\omega} &= b_0 \int \sigma'_{xz}(3)\omega dz. \end{aligned} \quad (9)$$

Система дифференциальных уравнений равновесия стержня для определения искомых перемещений получена в [4] с помощью метода Лагранжа. В нашем случае она имеет вид:

$$\begin{aligned} a_1 u'_{,xx} + a_6 \psi'_{,xx} - a_7 w'_{,xxx} &= p'_{\omega}, \\ a_6 u'_{,xx} + a_2 \psi'_{,xx} - a_3 w'_{,xxx} - a_5 \psi' &= h'_{\omega}, \\ a_7 u'_{,xxx} + a_3 \psi'_{,xxx} - a_4 w'_{,xxx} &= -q' + q'_{\omega}. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь коэффициенты  $a_1, \dots, a_7$  определены в [4]; величины  $p'_{\omega}, h'_{\omega}, q'_{\omega}$  учитывают физическую нелинейность материалов слоев и вычисляются по формулам, следующим из (7) и (9):

$$p'_{\omega} = \frac{1}{b_0} N'^{\omega}_{,x}, \quad h'_{\omega} = \frac{1}{b_0} (H'^{\omega}_{,x} - Q'^{\omega}), \quad q'_{\omega} = \frac{1}{b_0} M'^{\omega}_{,xx}. \quad (11)$$

$$N'^{\omega} = \frac{4}{3} b_0 \sum_{k=1}^3 G_k \int_{h_k} \omega'_k \varepsilon'_{xx}(k) dz, \quad M'^{\omega} = \frac{4}{3} b_0 \sum_{k=1}^3 G_k \int_{h_k} \omega'_k \varepsilon'_{xx}(k) z dz, \quad Q'^{\omega} = 2b_0 G_3 \int_{-c}^c \omega'_3 \psi' dz.$$

Система дифференциальных уравнений (10) существенно нелинейная. О точном ее решении в данном случае говорить не приходится, поэтому для ее решения необходимо использовать приближенные методы.

Рассмотрим возможность применения метода «упругих» решений Ильюшина в данной задаче. Предположим, что в (10), (11) содержится малый параметр, например, все  $\omega_k < 1$ . Тогда возможен метод итераций, основанный на методе упругих решений, при котором для любого  $n$ -го приближения система уравнений (10) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} a_1 u'^{(n)}_{,xx} + a_6 \psi'^{(n)}_{,xx} - a_7 w'^{(n)}_{,xxx} &= p'^{(n-1)}_{\omega}, \\ a_6 u'^{(n)}_{,xx} + a_2 \psi'^{(n)}_{,xx} - a_3 w'^{(n)}_{,xxx} - a_5 \psi'^{(n)} &= h'^{(n-1)}_{\omega}, \\ a_7 u'^{(n)}_{,xxx} + a_3 \psi'^{(n)}_{,xxx} - a_4 w'^{(n)}_{,xxx} &= -q' + q'^{(n-1)}_{\omega}, \end{aligned} \quad (12)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a_1 &= K_1^+ h_1 + K_2^+ h_2 + 2K_3^+ c; & a_2 &= c^2 \left[ K_1^+ h_1 + K_2^+ h_2 + \frac{2}{3} K_3^+ c \right]; \\ a_3 &= c \left[ K_1^+ h_1 \left( c + \frac{1}{2} h_1 \right) + K_2^+ h_2 \left( c + \frac{1}{2} h_2 \right) + \frac{2}{3} K_3^+ c^2 \right]; \\ a_4 &= K_1^+ h_1 \left( c^2 + c h_1 + \frac{1}{3} h_1^2 \right) + K_2^+ h_2 \left( c^2 + c h_2 + \frac{1}{3} h_2^2 \right) + \frac{2}{3} K_3^+ c^3; & a_5 &= 2G_3 c; \\ a_6 &= c \left[ K_1^+ h_1 - K_2^+ h_2 \right]; & a_7 &= K_1^+ h_1 \left( c + \frac{1}{2} h_1 \right) - K_2^+ h_2 \left( c + \frac{1}{2} h_2 \right). \end{aligned}$$

Величины  $p_{\omega}^{(n-1)}$ ,  $h_{\omega}^{(n-1)}$ ,  $q_{\omega}^{(n-1)}$ , соответствующие неупругим составляющим, на первом шаге ( $n = 1$ ) принимаются равными нулю, а в дальнейшем вычисляются по результатам предыдущего приближения и носят название дополнительных «внешних» нагрузок. Они служат поправками на пластичность и физическую нелинейность материалов слоев:

$$\begin{aligned} p_{\omega}^{(n-1)} &= \frac{1}{b_0} N'_{\omega}{}^{(n-1)}, \quad h_{\omega}^{(n-1)} = \frac{1}{b_0} (H'_{\omega}{}^{(n-1)} - Q'_{\omega}{}^{(n-1)}), \quad q_{\omega}^{(n-1)} = \frac{1}{b_0} M'_{\omega}{}^{(n-1)}, \\ N'_{\omega}{}^{(n-1)} &= \sum_{k=1}^3 N'^{(k)(n-1)} = \frac{4}{3} b_0 \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} G_k \omega'^{(k)} (\epsilon_u'^{(k)(n-1)}) \epsilon_{xx}'^{(k)(n-1)} dz, \\ M'_{\omega}{}^{(n-1)} &= \sum_{k=1}^3 M'^{(k)(n-1)} = \frac{4}{3} b_0 \sum_{k=1}^3 \int_{h_k} G_k \omega'^{(k)} (\epsilon_u'^{(k)(n-1)}) \epsilon_{xx}'^{(k)(n-1)} z dz, \\ H'_{\omega}{}^{(n-1)} &= c(N'^{(1)\omega(n-1)} - N'^{(2)\omega(n-1)}) + M'^{(3)\omega(n-1)}, \quad Q'_{\omega}{}^{(n-1)} = 2b_0 \int_{-c}^c G_3 \omega'^{(3)} (\epsilon_u'^{(3)(n-1)}) \psi'^{(n-1)} dz. \quad (13) \end{aligned}$$

Применение метода упругих решений позволяет на каждом шаге приближения рассматриваемую задачу сводить к линейной задаче теории упругости с дополнительными «внешними» нагрузками.

Рассмотрим изгиб трехслойного упругопластического стержня локальной поперечной поверхностной нагрузкой, распределенной по полуволне *синусоиды* (см. рисунок 1):

$$q'(x) = q_0 H_0(b-x) \sin\left(\frac{\pi x}{b}\right). \quad (14)$$

Подобные нагрузки часто встречаются на практике при эксплуатации элементов строительных конструкций.

Решение системы уравнений (12) при нагрузке (14) можно выписать, базируясь на известном решении задачи теории упругости [4]. В нашем случае оно имеет следующий рекуррентный вид:

$$\begin{aligned} \psi'^{(n)}(x) &= C_2'^{(n)} \operatorname{sh}(\beta x) + C_3'^{(n)} \operatorname{ch}(\beta x) - \frac{\gamma_1 C_1'^{(n)}}{\beta^2} + \\ &+ \frac{\gamma_1 q_0 b H_0(b-x)}{\beta^2 \pi} \left[ \frac{\beta^2 b^2 \cos\left(\frac{\pi x}{b}\right) + \beta^2 b^2 \operatorname{ch}(\beta x - \beta b)}{\pi^2 + \beta^2 b^2} - \operatorname{ch}(\beta x - \beta b) + 1 \right] + \\ &+ \frac{1}{\beta} \left[ \operatorname{sh}(\beta x) \int g_{\omega 1}'^{(n)} \operatorname{ch}(\beta x) dx - \operatorname{ch}(\beta x) \int g_{\omega 1}'^{(n)} \operatorname{sh}(\beta x) dx \right], \\ u'^{(n)}(x) &= \gamma_3 \psi'^{(n)} + \frac{1}{\alpha_2} \left( a_7 L_3^{-1}(q' - q_{\omega}'^{(n-1)}) - a_4 L_2^{-1}(p_{\omega}'^{(n-1)}) + \frac{a_7 C_1'^{(n)}}{2} x^2 \right) + C_7'^{(n)} x + C_8'^{(n)}, \\ w'^{(n)}(x) &= \frac{1}{\alpha_2} \left[ \alpha_1 \int \psi'^{(n)} dx - a_7 L_3^{-1}(p_{\omega}'^{(n-1)}) + \right. \\ &\left. + a_1 L_4^{-1}(q' - q_{\omega}'^{(n-1)}) + \frac{a_1 C_1'^{(n)}}{6} x^3 \right] + \frac{C_4'^{(n)}}{2} x^2 + C_5'^{(n)} x + C_6'^{(n)}. \quad (15) \end{aligned}$$

Здесь введены: функция

$$g_{\omega 1}'^{(n)}(x) = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \gamma_1 h_{\omega}'^{(n-1)} - \gamma_2 p_{\omega}'^{(n-1)} - \gamma_1 \left( \int q_{\omega}'^{(n-1)} dx + C_1'^{(n)} \right);$$

коэффициенты и линейные операторы

$$\beta^2 = \frac{a_1 a_3 \alpha_2}{\alpha_2 \alpha_3 - \alpha_1^2}, \quad \gamma_1 = \frac{a_1 \alpha_1}{\alpha_2 \alpha_3 - \alpha_1^2}, \quad \gamma_2 = \frac{a_6 \alpha_2 - a_7 \alpha_1}{\alpha_2 \alpha_3 - \alpha_1^2}, \quad \gamma_3 = \frac{a_3 a_7 - a_4 a_6}{\alpha_2},$$

$$\alpha_1 = a_1 a_3 - a_6 a_7, \quad \alpha_2 = a_1 a_4 - a_7^2, \quad \alpha_3 = a_1 a_2 - a_6^2;$$

$$L_2^{-1}(g) \equiv \iint g \, dx \, dx; \quad L_3^{-1}(g) \equiv \iiint g \, dx \, dx \, dx; \quad L_4^{-1}(g) \equiv \iiint g \, dx \, dx \, dx \, dx.$$

В рассматриваемом случае операторы от внешней синусоидальной нагрузки будут:

$$L_3^{-1}(q') = \frac{q_0 b^3}{\pi^3} \left[ \cos\left(\frac{\pi x}{b}\right) + 1 \right] H_0(b-x) - \frac{q_0 b}{\pi} H_2(b-x),$$

$$L_4^{-1}(q') = \frac{q_0 b^4}{\pi^4} \sin\left(\frac{\pi x}{b}\right) H_0(b-x) - \frac{q_0 b^3}{\pi^3} H_1(b-x) + \frac{q_0 b}{\pi} H_3(b-x);$$

интеграл от сдвига

$$\int \psi^{(n)} dx \Big|_{x=0} = \frac{C_2}{\beta} - \frac{\gamma_1 q_0 b^3 \operatorname{sh}(\beta b)}{\pi \beta (\pi^2 + \beta^2 b^2)} + \frac{\gamma_1 q_0 b \operatorname{sh}(\beta b)}{\pi \beta^3} - \frac{\gamma_1 q_0 b^2}{\pi \beta^2} +$$

$$+ \frac{1}{\beta} \int \operatorname{sh}(\beta x) \int g_{\omega 1}^{(n)} \operatorname{ch}(\beta x) dx - \operatorname{ch}(\beta x) \int g_{\omega 1}^{(n)} \operatorname{sh}(\beta x) dx dx \Big|_{x=0}.$$

Константы интегрирования  $C_1^{(n)}, \dots, C_8^{(n)}$  на каждом шаге приближения следуют из условий закрепления стержня. При консольной заделке левого конца стержня должны выполняться условия:

$$x = 0: \quad w = w_{,x} = u = \psi = 0;$$

$$x = l: \quad \psi = N = M = M_{,x} = 0. \quad (16)$$

Удовлетворяя решением (15) граничные условия (16) получим:

$$C_1^{(n)} = L_1^{-1}(q_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=l},$$

$$C_2^{(n)} = \frac{1}{\beta} \left[ \frac{\operatorname{ch}(\beta l)}{\operatorname{sh}(\beta l)} \left( \int g_{\omega 1}^{(n)} \operatorname{sh}(\beta x) dx \Big|_{x=l} - \int g_{\omega 1}^{(n)} \operatorname{sh}(\beta x) dx \Big|_{x=0} - \int g_{\omega 1}^{(n)} \operatorname{ch}(\beta x) dx \Big|_{x=l} + \right. \right.$$

$$\left. + \gamma_1 C_1^{(n)} \frac{\operatorname{sh}(\beta l)}{\beta} \right] + \frac{\gamma_1 q_0 b \operatorname{ch}(\beta l)}{\pi \beta^2 (\pi^2 + \beta^2 b^2) \operatorname{sh}(\beta l)} (2\beta^2 b^2 + \pi^2 - \pi^2 \operatorname{ch}(\beta x - \beta b)),$$

$$C_3^{(n)} = \frac{1}{\beta} \int g_{\omega 1}^{(n)}(x) \operatorname{sh}(\beta x) dx \Big|_{x=0} + \frac{\gamma_1 q_0 b}{\pi \beta^2 (\pi^2 + \beta^2 b^2)} (\pi^2 \operatorname{ch}(\beta x - \beta b) - 2\beta^2 b^2 - \pi^2),$$

$$C_4^{(n)} = -\frac{a_7}{\alpha_2} L_1^{-1}(p_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=l} + \frac{a_1}{\alpha_2} L_2^{-1}(q_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=l} - \frac{a_1}{\alpha_2} C_1^{(n)} l,$$

$$C_5^{(n)} = \frac{a_7}{\alpha_2} \left[ -L_2^{-1}(p_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=0} + L_3^{-1}(q_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=0} + \frac{q_0 b^3 (\pi^2 - 4)}{2\pi^3} \right],$$

$$C_6^{(n)} = -\frac{a_7}{\alpha_2} L_3^{-1}(p_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=0} + \frac{a_1}{\alpha_2} L_4^{-1}(q_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=0} - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \int \psi^{(n)} dx \Big|_{x=0} + \frac{a_1 q_0 b^4 (6 - \pi^2)}{6\alpha_2 \pi^3},$$

$$C_7^{(n)} = -\frac{1}{\alpha_2} \left[ a_4 L_1^{-1}(p_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=l} - a_7 (L_2^{-1}(p_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=l} + a_7 C_1^{(n)} l) \right],$$

$$C_8^{(n)} = \frac{1}{\alpha_2} \left( a_7 \left( \frac{a_7 q_0 b^3 (\pi^2 - 4)}{2\pi^3} + L_3^{-1}(q_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=0} \right) - a_4 L_2^{-1}(p_{\omega}^{(n-1)}) \Big|_{x=0} \right). \quad (17)$$

На первом шаге приближения ( $n = 1$ ) из соотношений (15) следует решение линейной задачи теории упругости.

**Повторное знакопеременное нагружение.** Пусть, начиная с момента  $t = t_1$ , осуществляется мгновенная разгрузка и повторное нагружение усилиями обратного знака, изменяющимися по тому же закону, что и при нагружении из естественного состояния (14):

$$q''(x) = -q_0 H_0(b-x) \sin\left(\frac{\pi x}{b}\right). \quad (18)$$

Усилия (18) создадут в  $k$ -м слое стержня поле перемещений  $u'', \psi'', w''$ , деформации  $\varepsilon_x^{(k)}, \varepsilon_y^{(k)}, \psi''$  и напряжения  $\sigma_x^{(k)}, s_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}, \sigma_{xz}^{(3)}$ . Сложность нахождения параметров соответствующего напряженно-деформированного состояния заключается в зависимости искомого решения от точки разгрузки  $(\varepsilon_{u1}, \sigma_{u1})$ , т.к. в каждой точке несущих слоев стержня, которая деформировалась пластически, изменяется предел текучести по деформациям. Это вызывает изменение физических уравнений состояния (3). В нелинейно упругом заполнителе уравнения состояния (5) остаются прежними, т.к. там пластических деформаций не возникает. В результате в каждой точке необходимо ставить свою краевую задачу и получать свое решение. Рассмотрим одну возможность избегания этих трудностей.

Введем разности для всех величин напряженно-деформированного состояния и нагрузки, в которых величины с одним штрихом – напряжения, деформации, внешние нагрузки и перемещения в стержне перед разгрузкой, двумя штрихами помечены аналогичные параметры в процессе второго полуцикла:

$$\begin{aligned}\sigma_x^{(k)*} &= \sigma_x^{(k)} - \sigma_x^{(k)'}, \quad s_x^{(k)*} = s_x^{(k)} - s_x^{(k)'}, \quad \sigma_y^{(k)*} = \sigma_y^{(k)} - \sigma_y^{(k)'}, \\ \sigma_{xz}^{(3)*} &= \sigma_{xz}^{(3)} - \sigma_{xz}^{(3)'}, \quad \varepsilon_x^{(k)*} = \varepsilon_x^{(k)} - \varepsilon_x^{(k)'}, \\ \vartheta_x^{(k)*} &= \vartheta_x^{(k)} - \vartheta_x^{(k)'}, \quad \varepsilon_y^{(k)*} = \varepsilon_y^{(k)} - \varepsilon_y^{(k)'}, \quad q^* = q' - q'', \quad p^* = p' - p'', \\ u^* &= u' - u'', \quad \psi^* = \psi' - \psi'', \quad w^* = w' - w''.\end{aligned}\quad (19)$$

В силу линейности связи деформаций с перемещениями в слоях стержня подобные соотношения будут справедливы и для величин со звездочками.

Для напряжений и деформаций в (19), отмеченных звездочками, в несущих слоях примем физические уравнения состояния типа (3), (5):

$$\begin{aligned}s_x^{(k)*} &= 2G_k f^{(k)*} \vartheta_x^{(k)*}, \quad \sigma_y^{(k)*} = 3K_k \varepsilon_y^{(k)*} \quad (k=1, 2, 3), \\ s_{xz}^{(3)*} &= 2G_3 f^{(3)*} \vartheta_{xz}^{(3)*}.\end{aligned}\quad (20)$$

Соответствующие универсальные функции пластичности  $f^{(k)*}$  в (20) для материалов несущих слоев согласно гипотезе Москвитина [12, 14] полагаем выраженными через функции пластичности при нагружении из естественного состояния:

$$\begin{aligned}f^{(k)*}(\varepsilon_u^{(k)}) &= \begin{cases} 1, & \varepsilon_u^{(k)*} \leq \varepsilon_y^{(k)*}, \\ 1 - \omega^{(k)*}, & \varepsilon_u^{(k)*} > \varepsilon_y^{(k)*}, \end{cases} \\ \omega^{(k)*} &= \omega^{(k)}(\varepsilon_u^{(k)*}, \varepsilon_y^{(k)*}, d_m^*).\end{aligned}\quad (21)$$

Здесь  $d_m^*$  – экспериментальные параметры материала, входящие в аппроксимационную формулу функции нелинейности, например, для сплава Д16–Т по аналогии с (4) принимаем:

$$\omega^{(k)*} = \begin{cases} 0, & \varepsilon_u^{(k)*} \leq \varepsilon_y^{(k)*}, \\ A_k^* \left( 1 - \frac{\varepsilon_y^{(k)*}}{\varepsilon_u^{(k)*}} \right)^{\alpha_k^*}, & \varepsilon_u^{(k)*} > \varepsilon_y^{(k)*}, \end{cases}$$

где  $A_k^* = 0,924$ ,  $\alpha_k^* = 2,27$ ,  $\varepsilon_y^{(k)*} = \alpha_2^{(k)} \varepsilon_y^{(k)}(T_1)$ ,  $\alpha_2^{(k)} = 2,02$  [6], причем случай  $\alpha_2^{(k)} > 2$  соответствует циклически упрочняющемуся материалу,  $\alpha_2^{(k)} < 2$  – разупрочняющемуся,  $\alpha_2^{(k)} = 2$  – для циклически идеального материала (нижний индекс «2» обозначает второй полуцикл).

Введем для величин со звездочками величины внутренних усилий, и представим их в виде суммы упругих и неупругих составляющих. Для этого в формулах (2), (6)–(9) нужно формально штрих сверху заменить звездочкой. В результате, с помощью вариационного принципа, придем к системе уравнений равновесия относительно перемещений со звездочками типа (10), которая в рекуррентном виде будет

$$\begin{aligned}a_1 u_{,xx}^{(n)*} + a_6 \psi_{,xx}^{(n)*} - a_7 w_{,xxx}^{(n)*} &= p_{\omega}^{(n-1)*}, \\ a_6 u_{,xx}^{(n)*} + a_2 \psi_{,xx}^{(n)*} - a_3 w_{,xxx}^{(n)*} - a_5 \psi^{(n)*} &= h_{\omega}^{(n-1)*},\end{aligned}$$



$$a_7 u_{,xxx}^{(n)*} + a_3 \psi_{,xxx}^{(n)*} - a_4 w_{,xxx}^{(n)*} = -q^* + q_{\omega}^{(n-1)*}. \quad (22)$$

Величины  $p_{\omega}^{(n-1)*}$ ,  $h_{\omega}^{(n-1)*}$ ,  $q_{\omega}^{(n-1)*}$  служат поправками на пластичность и физическую нелинейность материалов слоев. Они на первом шаге ( $n = 1$ ) принимаются равными нулю, а в дальнейшем вычисляются по результатам предыдущего приближения по формулам типа (13) с учетом соотношений (21).

В силу линейности соотношений (19) решения системы (22) должны удовлетворять граничным условиям типа (16). Поэтому, при построении аналитического итерационного решения краевой задачи воспользуемся решением (15). В результате, для перемещений со звездочками будут справедливы итерационные выражения:

$$\begin{aligned} \psi^{(n)*}(x) &= C_2^{(n)*} \operatorname{sh}(\beta x) + C_3^{(n)*} \operatorname{ch}(\beta x) - \frac{\gamma_1 C_1^{(n)*}}{\beta^2} + \\ &+ \frac{\gamma_1 q_0^* b H_0(b-x)}{\beta^2 \pi} \left[ \frac{\beta^2 b^2 \cos\left(\frac{\pi x}{b}\right) + \beta^2 b^2 \operatorname{ch}(\beta x - \beta b)}{\pi^2 + \beta^2 b^2} - \operatorname{ch}(\beta x - \beta b) + 1 \right] + \\ &+ \frac{1}{\beta} \left[ \operatorname{sh}(\beta x) \int g_{\omega 1}^{(n-1)*} \operatorname{ch}(\beta x) dx - \operatorname{ch}(\beta x) \int g_{\omega 1}^{(n-1)*} \operatorname{sh}(\beta x) dx \right], \\ u^{(n)*}(x) &= \gamma_3 \psi^{(n)*} + \frac{1}{\alpha_2} \left( a_7 L_3^{-1}(q_0^* - q_{\omega}^{(n-1)*}) + \frac{C_1^{(n)*} x^2}{2} - a_4 L_2^{-1}(p_{\omega}^{(n-1)*}) \right) + C_7^{(n)*} x + C_8^{(n)*}, \\ w^{(n)*}(x) &= \frac{1}{\alpha_2} \left[ \alpha_1 \int \psi^{(n)*} dx - a_7 L_3^{-1}(p_{\omega}^{(n-1)*}) + \right. \\ &\left. a_1 L_4^{-1}(q_0^* - q_{\omega}^{(n-1)*}) + \frac{a_1 C_1^{(n)*}}{6} x^3 \right] + \frac{C_4^{(n)*}}{2} x^2 + C_5^{(n)*} x + C_6^{(n)*}, \end{aligned} \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} \int \psi^{(n)*} dx \Big|_{x=0} &= \frac{C_2^*}{\beta} - \frac{q_0^*}{\pi \beta} \left( \frac{\gamma_1 b^3 \operatorname{sh}(\beta b)}{(\pi^2 + \beta^2 b^2)} + \frac{\gamma_1 b \operatorname{sh}(\beta b)}{\beta^2} - \frac{\gamma_1 b^2}{\beta} \right) + \\ &+ \frac{1}{\beta} \int \operatorname{sh}(\beta x) \int g_{\omega 1}^{(n)*} \operatorname{ch}(\beta x) dx - \operatorname{ch}(\beta x) \int g_{\omega 1}^{(n)*} \operatorname{sh}(\beta x) dx dx \Big|_{x=0}. \end{aligned}$$

Подставляя решение (23) в граничные условия типа (16), получим для констант интегрирования  $C_1^{(n)*}, \dots, C_8^{(n)*}$  выражения, совпадающие с (17), если в последних штрих заменить звездочкой. Следовательно, формулы (23), (24) дают в итерациях аналитическое решение краевой задачи в перемещениях для величин со звездочками при повторном локальном знакопеременном нагружении для консольного трехслойного стержня.

После этого параметры напряженно-деформированного состояния на втором полуцикле нагружения получим из соотношений (19):

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(k)}(x, z) &= \sigma_x^{(k)}(x, z) - \sigma_x^{(k)*}(x, z), \quad \sigma_{xz}^{(k)}(x, z) = \sigma_{xz}^{(k)}(x, z) - \sigma_{xz}^{(k)*}(x, z), \\ \varepsilon_x^{(k)}(x, z) &= \varepsilon_x^{(k)}(x, z) - \varepsilon_x^{(k)*}(x, z), \quad u''(x) = u'(x) - u^*(x), \\ \psi''(x) &= \psi'(x) - \psi^*(x), \quad w''(x) = w'(x) - w^*(x), \end{aligned} \quad (24)$$

где величины с одним штрихом – напряжения, деформации и перемещения в трехслойном стержне перед разгрузкой.

**Численные результаты.** При численной реализации решения принимались относительные толщины слоев  $h_1 = 0,02$ ,  $h_2 = 0,04$ ,  $c = 0,09$ . Нагрузка с интенсивностью  $q_0 = -3,5$  МПа ( $p_0 = 0$ ) равномерно распределена на отрезке  $[0, b]$ . Материалы слоев: сплав Д16Т, фторопласт-4, механические параметры материалов взяты в [4]. Численный счет продемонстрировал практическую сходимость метода упругих решений. За искомое решение

принято 8-е приближение, которое отличается от предыдущего менее чем на 1 %. Далее кривые без штриха – упругий стержень, один штрих – упругопластическое деформирование, два штриха – переменное нагружение.

На рисунке 2, а, б показано изменение прогиба и сдвига в заполнителе вдоль оси стержня при  $b = l$  при следующих нагрузках: 1 – синусоидальная  $q_0$ , 2 – прямоугольная  $q_0$ , распределенная на таком же отрезке; 3 – синусоидальная  $q_1 = 0,5\pi q_0$ , статически эквивалентная прямоугольной  $q_0$ . Здесь экстремумы перемещений при повторном нагружении уменьшаются по сравнению с нагружением на первом полуцикле за счет циклического упрочнения материала несущих слоев. С увеличением амплитуды синусоидальной нагрузки область пластических деформаций увеличивается и упрочнение усиливается.

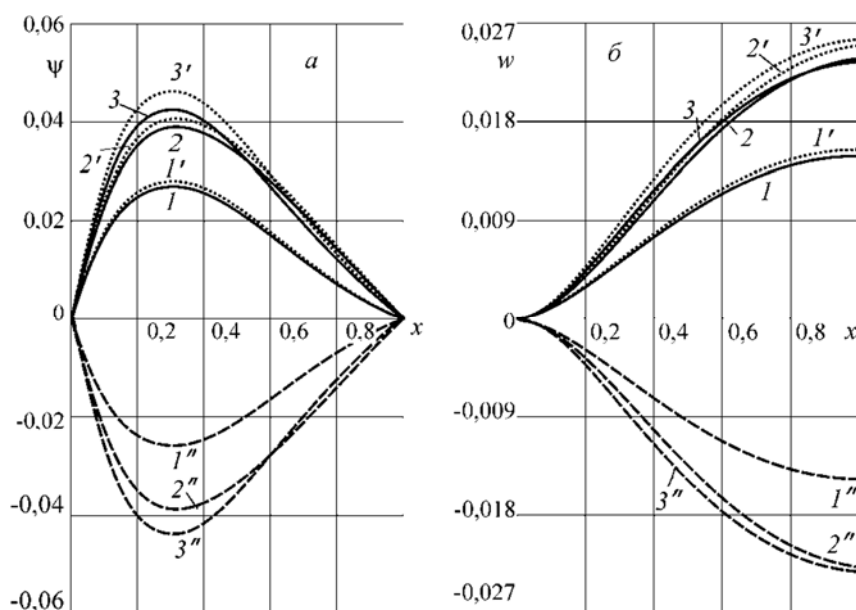


Рисунок 2 – Зависимость сдвига (а) и прогиба (б) трехслойного стержня при различных нагрузках

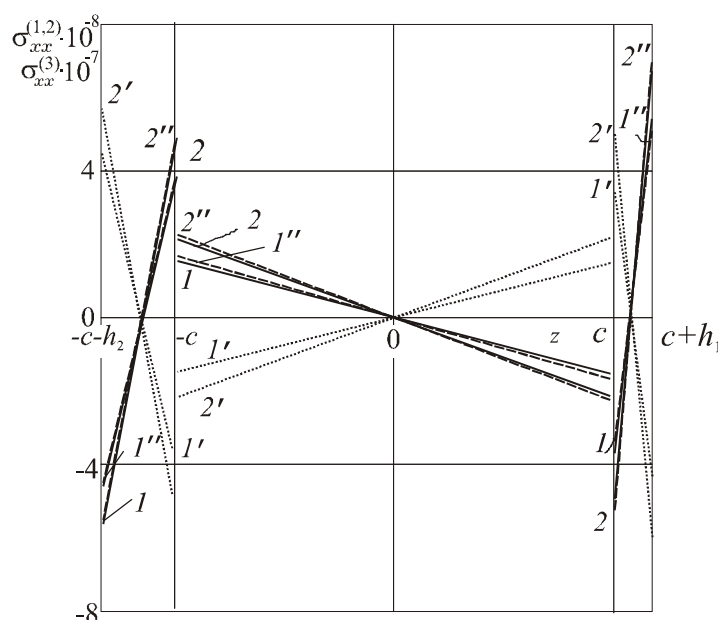


Рисунок 3 – Изменение напряжений по толщине трехслойного стержня при различных нагрузках

Распределение нормальных напряжений  $\sigma_{xx}$  по сечению в заделке ( $x = 0$ ) консольного стержня иллюстрирует рисунок 3 при различных амплитудах синусоидальной нагрузки: 1 –  $q_0$ , 2 –  $q_1$ . Здесь также из-за различной толщины несущих слоев напряжения в них отличаются на 5–6 %. Учет физической нелинейности приводит к увеличению

максимальных напряжений во внешних слоях на 5–6 %, в заполнителе – на 12–14 %. После перемены знака нагрузки напряжения практически не изменяются.

**Выводы.** Предложенная методика позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние трехслойного упругопластического стержня при повторном знакопеременном нагружении локальной синусоидальной нагрузкой. При этом решение новой краевой задачи строится по известному решению соответствующей задачи о нагружении из естественного состояния. Следует подчеркнуть, что приведенные решения справедливы только в области малых упругопластических деформаций при простых нагружениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотин, В.В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
2. Головкин, К.Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках / К.Г. Головкин, П.З. Луговой, В.Ф. Мейш. – Киев: Киевский ун-т, 2012. – 541 с.
3. Журавков, М.А. Математические модели сплошных сред. Теория упругости и пластичности / М.А. Журавков, Э.И. Старовойтов. – Минск: БГУ, 2011. – 540 с.
4. Плесакачевский, Ю.М. Динамика металлополимерных систем / Ю.М. Плесакачевский, Э.И. Старовойтов, А.В. Яровая. – Минск: Бел. наука, 2004. – 386 с.
5. Старовойтов, Э.И. Изгиб прямоугольной трехслойной пластины на упругом основании / Э.И. Старовойтов, Е.П. Доровская // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2006. – № 3. – С. 45–50.
6. Старовойтов, Э.И. Термоупругий изгиб кольцевой трехслойной пластины на упругом основании / Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко, М. Сулейман // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2006. – № 4. – С. 55–62.
7. Горшков, А.Г. Деформирование круговой трехслойной пластины на упругом основании / А.Г. Горшков, Э.И. Старовойтов, А.В. Яровая, Д.В. Леоненко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2005. – № 1. – С. 16–22.
8. Старовойтов, Э.И. Деформирование трехслойной ортотропной пластины ступенчато-переменной толщины / Э.И. Старовойтов, Д.В. Тарлаковский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 2 (304). – С. 38–43.
9. Горшков, А.Г. Гармоническое нагружение слоистых вязкоупругопластических систем / А.Г. Горшков, Э.И. Старовойтов, А.В. Яровая // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2000. – № 6. – С. 91–98.
10. Starovoitov, E.I. Vibration of circular sandwich plates under resonance loads / E.I. Starovoitov, D.V. Leonenko, A.V. Yarova // International Applied Mechanics. – 2003. – № 12. – pp. 1458–1463.
11. Горшков, А.Г. Колебания трехслойных стержней под действием локальных нагрузок различных форм / А.Г. Горшков, Э.И. Старовойтов, Д.В. Леоненко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2004. – № 1. – С. 45–52.
12. Москвитин, В.В. К исследованию напряженно-деформированного состояния двухслойных металлополимерных пластин при циклических нагружениях / В.В. Москвитин, Э.И. Старовойтов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1986. – № 1. – С. 116–121.
13. Ильюшин, А.А. Пластичность. Ч. 1. Упругопластические деформации / А.А. Ильюшин. – М.: Гостехиздат, 1948. – 376 с.
14. Москвитин, В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций / В.В. Москвитин. – М.: Наука, 1981. – 344 с.

**Старовойтов Эдуард Иванович**  
Белорусский государственный  
университет транспорта  
зав. кафедрой «Строительная  
механика» Белорусского  
государственного университета  
транспорта, доктор физ.-мат. наук,  
профессор  
Тел.: (0232) 95–39–61  
E-mail: edstar0@yandex.by

**Леоненко Денис Владимирович**  
Белорусский государственный  
университет транспорта  
профессор кафедры «Строительная  
механика» Белорусского  
государственного университета  
транспорта, доктор физ.-мат. наук,  
доцент  
Тел.: (+375232) 95–39–61  
E-mail: leoden@tut.by

**Журавков Михаил Анатольевич**  
Белорусский государственный  
университет  
Министерство образования РБ, зав.  
кафедрой «Теоретическая и  
прикладная механика»  
Белорусского государственного  
университета, доктор физ.-мат.  
наук, профессор  
E-mail: zhuravkov@bsu.by

E.I. STAROVOITOV, D.V. LEONENKO, M.A. ZHURAVKOV

## THE VARIABLE DEFORMATION OF THE THREE-LAYER ROD BY LOCAL SINUSOIDAL LOAD

*The variable loading of three-layer elastoplastic beam under local sinusoidal load is considered. For the kinematics description asymmetrical on the thickness of package accepted hypothesis broken normal. The method of solving the corresponding boundary-value problems is given. The analytical decisions of elastic-plastic problem with forward and reverse loading are received and their numeric analysis is conducted.*

**Keywords:** alternating loading, plasticity, three-layer beam.

### BIBLIOGRAPHY

1. Bolotin, V.V. Mekhanika mnogoslonykh konstruktsey / V.V. Bolotin, YU.N. Novichkov. – M.: Mashinostroyeniye, 1980. – 375 s.
2. Golovko, K.G. Dinamika neodnorodnykh obolochek pri nestatsionarnykh nagruzkakh / K.G. Golovko, P.Z. Lugovoy, V.F. Meysh. – Kiyev: Kiyevskiy un-t, 2012. – 541 s.
3. Zhuravkov, M.A. Matematicheskiye modeli sploshnykh sred. Teoriya uprugosti i plastichnosti / M.A. Zhuravkov, E.I. Starovoytov. – Minsk: BGU, 2011. – 540 s.
4. Pleskachevskiy, YU.M. Dinamika metallopolimernykh sistem / YU.M. Pleskachevskiy, E.I. Starovoytov, A.V. Yarovaya. – Minsk: Bel. navuka, 2004. – 386 s.
5. Starovoytov, E.I. Izgib pryamougolnoy trekhsloynoy plastiny na uprugom osnovanii / E.I. Starovoytov, Ye.P. Dorovskaya // Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii. – 2006. – № 3. – S. 45–50.
6. Starovoytov, E.I. Termouprugiy izgib koltsevoy trekhsloynoy plastiny na uprugom osnovanii / E.I. Starovoytov, D.V. Leonenko, M. Suleyman // Ekologicheskij vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva. – 2006. – № 4. – S. 55–62.
7. Gorshkov, A.G. Deformirovaniye krugovoy trekhsloynoy plastiny na uprugom osnovanii / A.G. Gorshkov, E.I. Starovoytov, A.V. Yarovaya, D.V. Leonenko // Ekologicheskij vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva. – 2005. – № 1. – S. 16–22.
8. Starovoytov, E.I. Deformirovaniye trekhsloynoy ortotropnoy plastiny stupenchato-peremennoy tolshchiny / E.I. Starovoytov, D.V. Tarlovskiy // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 2 (304). – S. 38–43.
9. Gorshkov, A.G. Garmonicheskoye nagruzheniye sloistykh vyazkouprugoplasticheskikh sistem / A.G. Gorshkov, E.I. Starovoytov, A.V. Yarovaya // Izv. RAN. Mekhanika tverdogo tela. – 2000. – № 6. – S. 91–98.
10. Starovoytov, E.I. Vibration of circular sandwich plates under resonance loads / E.I. Starovoytov, D.V. Leonenko, A.V. Yarovaya // International Applied Mechanics. – 2003. – № 12. – pp. 1458–1463.
11. Gorshkov, A.G. Kolebaniya trekhsloynnykh sterzhney pod deystviyem lokalnykh nagruzk razlichnykh form / A.G. Gorshkov, E.I. Starovoytov, D.V. Leonenko // Ekologicheskij vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva. – 2004. – № 1. – S. 45–52.
12. Moskvitin, V.V. K issledovaniyu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dvukhsloynnykh metallopolimernykh plastin pri tsiklicheskiykh nagruzheniyakh / V.V. Moskvitin, E.I. Starovoytov // Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela. – 1986. – № 1. – S. 116–121.
13. Ilyushin, A.A. Plastichnost. CH. 1. Uprugoplasticheskiye deformatsii / A.A. Ilyushin. – M.: Gostekhizdat, 1948. – 376 s.
14. Moskvitin, V.V. Tsiklicheskiye nagruzheniye elementov konstruktsey / V.V. Moskvitin. – M.: Nauka, 1981. – 344 s.

**Starovoytov Eduard Ivanovich**  
Belarusian State University of  
Transport  
Head of the department «Structural  
Mechanics» of the Belarusian State  
University of Transport, Doctor of  
Physical and Mathematical Sciences,  
Professor  
E-mail: edstar0@yandex.by

**Leonenko Denis Vladimirovich**  
Belarusian State University of  
Transport  
Professor of «Structural mechanics»  
of the Belarusian State University of  
Transport, Doctor of Physical and  
Mathematical Sciences, Associate  
Professor  
E-mail: leoden@tut.by

**Zhuravkov Michael Anatolievich**  
Belarusian State University  
Head of the department «Theoretical  
and Applied Mechanics» of the  
Belarusian State University, Doctor  
of Physical and Mathematical  
Sciences, Professor  
E-mail: zhuravkov@bsu.by

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ** **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

УДК 539.4.015

В.Г. МАЛИНИН, Ю.Ю. МУССАУИ, Е.А. ТРИФОНОВ

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАРТЕНСИТНОЙ НЕУПРУГОСТИ СПЛАВА Ti–50%Ni ПРИ СЛОЖНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ В ВИДЕ СПИРАЛИ АРХИМЕДА: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ**

*Изучено поведение материала, обладающего эффектом памяти формы (ЭПФ), при сложных траекториях изотермического деформирования в виде спирали Архимеда. Для рассматриваемого класса траекторий получены эмпирические данные, отражающие характер изменения неупругих свойств изучаемого сплава Ti–50%Ni в результате структурных преобразований исходного неориентированного мартенсита. На основании экспериментальных результатов методами структурно–аналитической мезомеханики сформулирована математическая модель и выполнен расчёт мартенситной неупругости для изучаемого класса траекторий.*

**Ключевые слова:** структурно–аналитическая мезомеханика; траектория деформирования по спирали Архимеда; мартенситная неупругость; экспериментальные исследования; математическая модель.

Особый интерес в механике деформируемого твёрдого тела представляют материалы, обладающие эффектом памяти формы, для которых характерно неупругое поведение, связанное со структурными или фазовыми переходами при изотермическом деформировании в различных интервалах характеристических температур. Настоящая статья посвящена изучению мартенситной неупругости материалов с памятью формы при изотермическом деформировании ниже температуры конца мартенситной реакции ( $M_K$ ). В таком случае сплавы с памятью формы обладают способностью к обратимым мартенситным превращениям путём сложных переориентаций кристаллической решётки через промежуточное аустенитное состояние. Образующийся в ходе такой реакции под действием внешних полей напряжений механоаустенит либо немедленно, либо на поздних стадиях при больших напряжениях оказывается неустойчивым и трансформируется в мартенсит, но отличной от исходного кристаллографической ориентации [1].

Существующие теоретические и экспериментальные исследования преимущественно выполнялись для пропорциональных и близких к ним траекторий деформирования [1], а именно чистым растяжением, кручением и их комбинациями. Значительный вклад в разработку аналитических методов расчёта деформационных эффектов при структурных и фазовых превращениях сплавов с памятью формы выполнен под руководством И.Н. Андропова [2, 4], С.П. Беляева, А.Е. Волкова, С.С. Гаврюшина [3, 4], А.А. Мовчана [5, 6], А.И. Разова и др.

Особое место среди программ по сложному нагружению занимают плоские траектории постоянной кривизны, двухзвенные траектории с изломом, а также траектории деформирования по спирали Архимеда. Перечисленному классу траекторий, но для материалов с дислокационным механизмом превращения посвящены фундаментальные исследования школы В.Г. Зубчанинова [7].

Следует отметить, что некоторые экспериментальные результаты и расчёт мартенситной неупругости сплавов с памятью формы при сложных траекториях деформирования приведены в работах [8–11].

В настоящей статье рассматриваются экспериментальные результаты и теоретическое моделирование мартенситной неупругости материалов с памятью формы при сложных траекториях деформирования по спирали Архимеда.

Программа экспериментальных исследований состоит из одного этапа, включающего собственно деформирование по спирали Архимеда с центром в начале координат. Увеличение интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  до максимального значения  $\varepsilon_i = 0,5\%$  производится за три оборота спирали против часовой стрелки. На рисунке 1 представлена схема программы испытаний в координатах  $\varepsilon = f(\gamma/\sqrt{3})$ , где  $\gamma$  – угловая деформация;  $\varepsilon$  – линейная деформация. Опыты проводились при комнатной температуре ( $T_d = 20^\circ\text{C}$ ), когда материал находится полностью в мартенситном состоянии. На основании полученных данных выполнено построение экспериментальных точек в координатах  $\sigma_i = \sigma_i(\varphi)$ , где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений,  $\varphi$  – параметр, характеризующий вид деформированного состояния и определяемый выражением:  $\text{tg}\varphi = (\gamma/\sqrt{3})/\varepsilon$ .

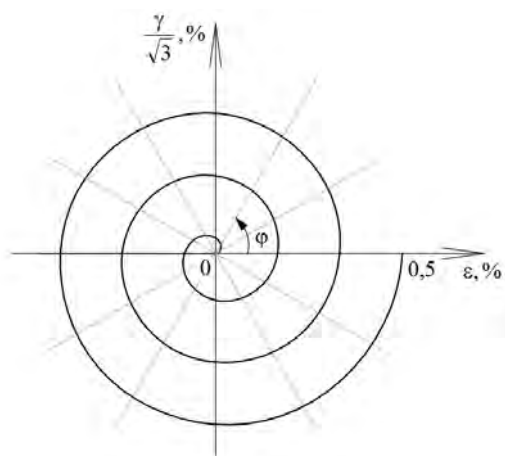


Рисунок 1 – Схема испытаний тонкостенного образца при траекториях деформирования по спирали Архимеда

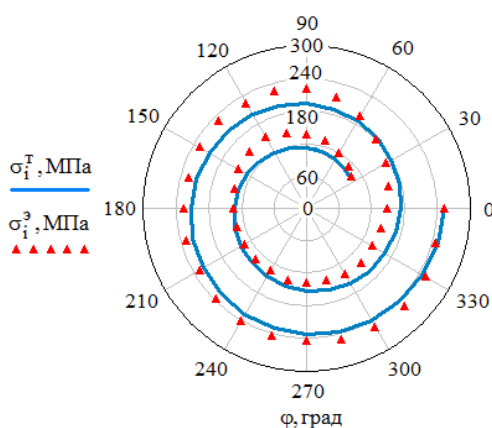


Рисунок 2 – Экспериментальные и теоретические зависимости в координатах  $\sigma_i = \sigma_i(\varphi)$

Отметим, что в данной программе процесс деформирования задавался в пространстве деформаций (рисунок 1), а реакция материала представлялась в виде экспериментальных данных и теоретических расчётов (рисунок 2) в пространстве напряжений. На рисунке 2 представлены результаты построения экспериментальных точек ( $\Delta$ ) и теоретических кривых (сплошная линия) соответственно в координатах  $\sigma_i = \sigma_i^Э(\varphi)$  и  $\sigma_i = \sigma_i^T(\varphi)$ , где  $\sigma_i^Э$  – экспериментальные значения интенсивности напряжений;  $\sigma_i^T$  – теоретические значения интенсивности напряжений. Следует отметить, что сопоставление экспериментальных и теоретических результатов на рисунке 2 приводится, начиная от угла  $\varphi_0$ , в котором значение интенсивности напряжений равно пределу пропорциональности  $\sigma_i(\varphi_0) = \sigma_{i, \text{пц}}$ , где  $\sigma_{i, \text{пц}}$  – предел пропорциональности изучаемого сплава.

Основываясь на методике, изложенной в [1, 10], предполагается, что поликристаллическое тело макроскопически изотропно и подвергается траекториям деформирования по спирали Архимеда (рисунок 1) и, что имеет место мартенситная реакция только первого рода.

Уравнение Клаузиуса–Клапейрона записывается в виде:

$$\dot{T}^* = \dot{T} + \left( \frac{T_0}{q_0} \cdot D_i \right) \cdot \dot{\sigma}_i; \quad \dot{T}^* = \left( \frac{T_0}{q_0} \cdot D_i \right) \cdot \dot{\sigma}_i = k \cdot \dot{\sigma}_i, \quad (1)$$

где  $T_0$  – температура термодинамического равновесия;

$q_0$  – тепловой эффект реакции;

$D_i$  – дисторсия превращения;

$\dot{\sigma}_i$  – скорость изменения интенсивности напряжений. Здесь и далее точка над символом означает производную по времени.

Рассмотрим основные этапы моделирования процесса деформирования в условиях мартенситных превращений. После ориентационного усреднения (по методике, изложенной в [1]) компонент тензора деформаций, возникающих на мезомасштабном уровне в результате процессов структурных превращений: мартенсит охлаждения  $\rightarrow$  виртуальный аустенит напряжений  $\rightarrow$  мартенсит напряжений, на макроскопическом уровне получим дифференциальное уравнение для расчёта деформации мартенситной неупругости при изотермическом нагружении в интервале температур ниже температуры конца мартенситной реакции в виде:

$$\dot{\epsilon}_{ik} = 2 \cdot B_{\Phi} \cdot \dot{\Phi} \cdot \text{Dev}(\sigma_{ik}) \cdot H(-\dot{T}^*), \quad (2)$$

где  $\dot{\epsilon}_{ik}$  – тензор скоростей неупругих деформаций мартенситной природы;

$B_{\Phi}$  – параметр структурно-механической податливости материала с ЭПФ;

$\dot{\Phi}$  – скорость изменения фазового состава;

$\text{Dev}(\sigma_{ik})$  – девиатор напряжений;

$H(-\dot{T}^*)$  – функция Хевисайда.

Кинетика образования и исчезновения мартенсита представляется уравнением:

$$\begin{aligned} \dot{\Phi} = & -\dot{T}^* \cdot \left( H(T^* - M_K) \cdot H(-\dot{T}^*) \cdot H(M_H - \Phi(M_H - M_K) - T^*) \cdot (M_H - M_K)^{-1} + \right. \\ & \left. + H(\Phi) \cdot H(\dot{T}^*) \cdot H(T^* + \Phi \cdot (A_K - A_H) - A_K) \cdot (A_K - A_H)^{-1} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\dot{T}^*$  – скорость изменения эффективной температуры [1];

$M_H, M_K, A_H, A_K$  – температуры соответственно начала и конца прямой и обратной мартенситной реакции.

После выполнения математических преобразований с учётом равенств (1) – (3), получаем систему дифференциальных уравнений, решениями которых являются функции нормальных и касательных напряжений для плоских траекторий деформирования произвольной кривизны:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_i \cdot \sigma_{11} = A \cdot \dot{\epsilon}(t) \\ \dot{\sigma}_i \cdot \sqrt{3} \cdot \sigma_{12} = A \cdot \dot{\gamma}^*(t), \end{cases} \quad (4)$$

где  $A = \left( \frac{B_{\Phi 1}^* \cdot k}{M_H - M_K} \right)^{-1}$ ;  $B_{\Phi 1}^* = 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot B_{\Phi 1}$ ;  $\dot{\gamma}^* = \frac{\dot{\gamma}}{\sqrt{3}}$ .

Решениями дифференциальных уравнений (4) являются функции нормальных и касательных напряжений для произвольных траекторий деформирования:

$$\sigma_{11} = \pm \frac{\dot{\epsilon}(t)}{\dot{\epsilon}_i(t)} \cdot \sqrt{\int 2 \cdot A \cdot |\dot{\epsilon}_i(t)| dt + C}; \quad (5)$$

$$\sqrt{3} \cdot \sigma_{12} = \pm \frac{\dot{\gamma}^*(t)}{\dot{\epsilon}_i(t)} \cdot \sqrt{\int 2 \cdot A \cdot |\dot{\epsilon}_i(t)| dt + C}; \quad (6)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\int 2 \cdot A \cdot |\dot{\epsilon}_i(t)| dt + C}, \quad (7)$$

где  $C$  – константа интегрирования, которая определяется из начальных условий.

**Вариант моделирования при  $B_{\Phi} = \text{const}$ .** После интегрирования и определения константы  $C$ , получаем выражения для расчёта нормальных и касательных напряжений при деформировании по спирали Архимеда при температуре ниже  $M_K$ :

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \pm \frac{\cos \alpha - \alpha \cdot \sin \alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \cdot \sqrt{A \cdot a \cdot |Q(\alpha) - Q(\alpha_0)| + \sigma_{i, \text{пл}}^2}; \\ \sqrt{3} \cdot \sigma_{12} &= \pm \frac{\sin \alpha + \alpha \cdot \cos \alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \cdot \sqrt{A \cdot a \cdot |Q(\alpha) - Q(\alpha_0)| + \sigma_{i, \text{пл}}^2}; \\ \sigma_i &= \sqrt{A \cdot a \cdot |Q(\alpha) - Q(\alpha_0)| + \sigma_{i, \text{пл}}^2},\end{aligned}\quad (8)$$

где  $\alpha = \varphi + \lambda$ ;  $\alpha_0 = \varphi_0 + \lambda$ ;  $\lambda$  – определяется из уравнения:  $\sin \lambda + (\varphi_0 + \lambda) \cdot \cos \lambda = 0$ ;  
 $A$  – определяется из выражения (4);  
 $a$  – шаг спирали, определяемый из выражения  $a = \varepsilon_i / \varphi$ .  
 Функция  $Q(\alpha)$  определяется выражением:

$$Q(\alpha) = \alpha \cdot \sqrt{1 + \alpha^2} + \ln \left| \alpha + \sqrt{1 + \alpha^2} \right|.$$

На рисунке 2 в координатах  $\sigma_i = \sigma_i(\varphi)$  приведено сопоставление результатов экспериментальных исследований в виде точек ( $\Delta$ ) и аналитических расчётов (сплошная линия) при следующих характеристиках материала:  $M_H = 333 \text{ K}$ ;  $M_K = 311 \text{ K}$ ;  $A_H = 353 \text{ K}$ ;  $A_K = 375 \text{ K}$ ;  $T_d = 293 \text{ K}$ ;  $\sigma_{i, \text{пл}} = 99 \text{ МПа}$ ;  $\varepsilon_{i, \text{пл}} = 0,168\%$ ;  $a = 2,432 \cdot 10^{-4}$ ;  $k = 6,062 \cdot 10^{-7} \text{ К} \cdot \text{Дж}^{-1} \cdot \text{м}^3$ ;  $\varphi_0 = 395,8^0$ ;  $B_\phi = 4,314 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ . Среднее значение отклонения теоретической кривой от экспериментальных составляет 9,39%. Для лучшего соответствия результатов теоретических расчётов экспериментальным данным достаточно  $B_\phi^*$  представить в виде функции от параметра  $\varphi$ .

**Вариант моделирования при  $B_\phi = B_\phi(\varphi)$ .** Заметим, что в излагаемом варианте теории структурно–механическая податливость  $B_\phi$  рассматривается как функция параметра вида деформированного состояния  $\varphi$ .

После выполнения некоторых математических преобразований, а также решения уравнений (1) – (3), получим следующие выражения для расчёта компонент тензора напряжений при траекториях деформирования по спирали Архимеда:

$$\sigma_{11} = \pm \frac{\cos \alpha - \alpha \cdot \sin \alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot A \cdot a \cdot |Q(\varphi) - Q(\varphi_0)| + \sigma_{i, \text{пл}}^2}; \quad (9)$$

$$\sqrt{3} \cdot \sigma_{12} = \pm \frac{\sin \alpha + \alpha \cdot \cos \alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot A \cdot a \cdot |Q(\varphi) - Q(\varphi_0)| + \sigma_{i, \text{пл}}^2}; \quad (10)$$

$$\sigma_i = \sqrt{2 \cdot A \cdot a \cdot |Q(\varphi) - Q(\varphi_0)| + \sigma_{i, \text{пл}}^2}, \quad (11)$$

где

$$Q(\varphi) - Q(\varphi_0) = \int_{\varphi_0}^{\varphi} \frac{\sqrt{1 + (\varphi + \lambda)^2}}{f(\varphi)} d\varphi. \quad (12)$$

где  $f(\varphi)$  – искомая функция, характеризующая изменение структурно–механической податливости материала в процессе деформирования.

Важно отметить, что из результатов экспериментальных данных находится именно функция  $Q(\varphi) - Q(\varphi_0)$ , а затем дифференцируя полученную функцию в соответствии уравнением (12), получаем искомую функцию  $f(\varphi)$ . Таким образом, получаем функцию  $Q(\varphi) - Q(\varphi_0)$  в следующем виде:

$$Q(\varphi) - Q(\varphi_0) = a_0 \cdot (\varphi - \varphi_0)^3 + a_1 \cdot (\varphi - \varphi_0)^2 + a_2 \cdot (\varphi - \varphi_0) + a_3 \cdot \cos(2 \cdot (\varphi - \varphi_0)) - a_3,$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты, определяемые из сопоставления экспериментальных и теоретических данных согласно уравнениям:



$$\sigma_{ij}^T(\varphi_j) = \sigma_{ij}^E(\varphi_j)$$

где  $j = 1, 2, 3, 4$ .

На рисунке 3 в координатах  $\sigma_i = \sigma_i(\varphi)$  представлены теоретические и экспериментальные результаты. Среднее значение отклонения теоретических расчётов от экспериментальных данных составляет 7,1%.

Таким образом, методы структурно-аналитической мезомеханики позволяют рассчитать сложное поведение материалов с памятью формы при структурных превращениях для плоских траекторий деформирования по спирали Архимеда.

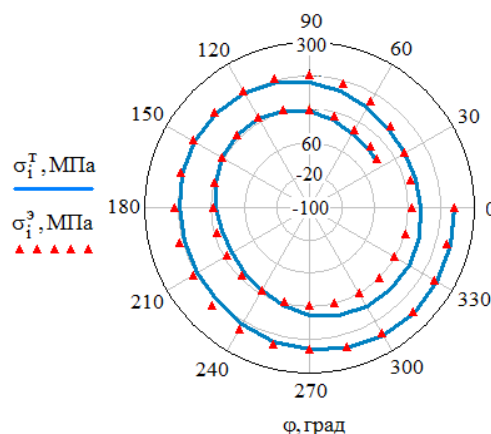


Рисунок 3 – Экспериментальные и теоретические зависимости в координатах  $\sigma_i = \sigma_i(\varphi)$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачёв, В. А. Структурно-аналитическая теория прочности / В. А. Лихачёв, В. Г. Малинин. – СПб.: Наука, 1993. – 471 с.
2. Андронов, И.Н. Механические свойства материалов с эффектом памяти формы при сложном температурно-силовом воздействии и ортогональном нагружении / И.Н. Андронов. – Ухта: УГТУ, 2010. – 190 с.
3. Ганыш, С.М. Простейшая математическая модель пространственного стержня, выполненного из сплава с эффектом памяти формы / С.М. Ганыш, С.С. Гаврюшин // Инженерный вестник. – 2014. – № 10. – С. 69.
4. Ганыш, С.М. Экспериментальное определение параметров диаграммы фазовых переходов для сплава с эффектом памяти формы / С.М. Ганыш, С.С. Гаврюшин, И.Н. Андронов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 11. – С. 79 – 83.
5. Мовчан, А.А. Материалы с памятью формы как объект механики деформируемого твердого тела: экспериментальные исследования, определяющие соотношения, решение краевых задач / А.А. Мовчан, С.А. Казарина // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 1. – С. 105–116.
6. Мовчан, А.А. Сплавы с памятью формы: микро- и макро- механика, определяющие соотношения, краевые задачи, устойчивость / А.А. Мовчан // VI сессия научного совета РАН по механике. Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – 2012. – С. 43–45.
7. Зубчанинов, В.Г. Экспериментальная пластичность. Монография. Книга 1. Процессы сложного деформирования / В.Г. Зубчанинов, Н.Л. Охлопков, В.В. Гараников. – Тверь: ТГТУ, 2003. – 172 с.
8. Малинин, В.Г. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния процессов сложного деформирования на эффекты мартенситной неупругости / В.Г. Малинин, Ю.Ю. Муссауи, Д.В. Ефремов // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела. Материалы VIII Международного научного симпозиума, посвященного 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора В.Г. Зубчанинова. ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет». – 2015. – С. 54–58.
9. Малинин, В.Г. Экспериментальные исследования и моделирование изотермических траекторий деформирования постоянной кривизны при мартенситных превращениях сплава Ti–50%Ni методами структурно-аналитической мезомеханики / В.Г. Малинин, Ю.Ю. Муссауи, Д.В. Ефремов // Национальная ассоциация учёных (НАУ). – 2015. – № 9 (14). – С. 103.
10. Малинин, Г.В. Деформация мартенситной неупругости при сложных траекториях изотермического нагружения в материалах с эффектом памяти формы / Г.В. Малинин. – Орёл: «Строительство и реконструкция». – 2012. – № 6 (44). – С. 88 – 96.
11. Малинин, В.Г. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния процессов сложного нагружения на эффекты мартенситной неупругости методами структурно-аналитической мезомеханики / В.Г. Малинин, Н.А. Малинина, Г.В. Малинин, А.И. Перелыгин // Проблемы прочности, пластичности и устойчивости в механике деформируемого твердого тела. Материалы VIII Международного научного симпозиума, посвященного 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ, профессора В.Г. Зубчанинова. ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет». – 2015. – С. 59–65.

**Малинин Владислав Георгиевич**  
Орловский государственный  
аграрный университет  
Доктор физико-математических  
наук, профессор кафедры  
«Инженерная графика и механика»  
Орёл, ул. Генерала Родина, 69  
E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

**Муссауи Юсеф Юсефович**  
Орловский государственный  
аграрный университет  
Аспирант  
Орёл, ул. Генерала Родина, 69  
E-mail: yusmus@yandex.ru

**Трифонов Евгений Андреевич**  
Орловский государственный  
аграрный университет  
Инженер  
Орёл, ул. Генерала Родина, 69  
E-mail: trifonovzhenua@yandex.ru

# MARTENSITIC INELASTICITY OF ALLOY Ti–50Ni WHILE DEFORMING UNDER COMPLEX TRAJECTORIES BY ARCHIMEDES SPIRAL: EXPERIMENTAL RESULTS, MATHEMATICAL MODEL

*Behavior of materials with shape memory effect (SME) while deforming under complex trajectories by Archimedes spiral is studied. For the studied class of trajectories, experimental data achieved, showing the nature of inelastic property changes of alloy Ti–50%Ni with shape memory, caused by structural transformations of non-oriented martensite. Based on experimental data mathematical model was formulated, calculation of martensitic inelasticity were made for the studied class of trajectories.*

**Keywords:** shape memory effect; deformation trajectory by Archimedes spiral; martensitic inelasticity; experimental research; mathematical model.

## BIBLIOGRAPHY

1. Likhachov, V. A. Strukturno–analiticheskaya teoriya prochnosti / V. A. Likhachov, V. G. Malinin. – SPb.: Nauka, 1993. – 471 s.
2. Andronov, I.N. Mekhanicheskiye svoystva materialov s efektom pamyati formy pri slozhnom temperaturno–silovom vozdeystvii i ortogonalnom nagruzhении / I.N. Andronov. – Ukhta: UGTU, 2010. – 190 s.
3. Ganysh, S.M. Prosteyshaya matematicheskaya model prostranstvennogo sterzhnya, vypolnennogo iz splava s efektom pamyati formy / S.M. Ganysh, S.S. Gavryushin // Inzhenernyy vestnik. – 2014. – № 10. – S. 69.
4. Ganysh, S.M. Eksperimentalnoye opredeleniye parametrov diagrammy fazovykh perekhodov dlya splava s efektom pamyati formy / S.M. Ganysh, S.S. Gavryushin, I.N. Andronov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. – 2012. – № 11. – S.79 – 83.
5. Movchan, A.A. Materialy s pamyatyu formy kak ob'yekt mekhaniki deformiruyemogo tverdogo tela: eksperimentalnyye issledovaniya, opredelyayushchiye sootnosheniya, resheniye krayevykh zadach / A.A. Movchan, S.A. Kazarina // Fizicheskaya mezomekhanika. – 2012. – T. 15. – № 1. – S. 105–116.
6. Movchan, A.A. Splavy s pamyatyu formy: mikro– i makro– mekhanika, opredelyayushchiye sootnosheniya, krayevyye zadachi, ustoychivost / A.A. Movchan // VI sessiya nauchnogo soвета RAN po mekhanike. Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet im. I.I. Polzunova. – 2012. – S. 43–45.
7. Zubchaninov, V.G. Eksperimentalnaya plastichnost. Monografiya. Kniga 1. Protsessy slozhnogo deformirovaniya / V.G. Zubchaninov, N.L. Okhlopov, V.V. Garanikov. – Tver: TGTU, 2003. – 172 s.
8. Malinin, V.G. Eksperimentalnoye i teoreticheskoye issledovaniye vliyaniya protsessov slozhnogo deformirovaniya na efekty martensitnoy neuprugosti / V.G. Malinin, YU.YU. Mussau, D.V. Yefremov // Problemy prochnosti, plastichnosti i ustoychivosti v mekhanike deformiruyemogo tverdogo tela. Materialy VIII Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma, posvyashchennogo 85–letiyu so dnya rozhdeniya zasluzhennogo deyatelya nauki i tekhniki RF, professora V.G. Zubchaninova. FGBOU VPO «Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet». – 2015. – S. 54–58.
9. Malinin, V.G. Eksperimentalnyye issledovaniya i modelirovaniye izotermicheskikh trayektoriy deformirovaniya postoyannoy krivizny pri martensitnykh prevrashcheniyakh splava Ti–50%Ni metodami strukturno–analiticheskoy mezomekhaniki / V.G. Malinin, YU.YU. Mussau, D.V. Yefremov // Natsionalnaya assotsiatsiya uchonykh (NAU). – 2015. – № 9 (14). – S. 103.
10. Malinin, G.V. Deformatsiya martensitnoy neuprugosti pri slozhnykh trayektoriyakh izotermicheskogo nagruzheniya v materialakh s efektom pamyati formy / G.V. Malinin. – Orol: «Stroitelstvo i rekonstruktsiya». – 2012. – № 6 (44). – S. 88 – 96.
11. Malinin, V.G. Eksperimentalnoye i teoreticheskoye issledovaniye vliyaniya protsessov slozhnogo nagruzheniya na efekty martensitnoy neuprugosti metodami strukturno–analiticheskoy mezomekhaniki / V.G. Malinin, N.A. Malinina, G.V. Malinin, A.I. Perelygin // Problemy prochnosti, plastichnosti i ustoychivosti v mekhanike deformiruyemogo tverdogo tela. Materialy VIII Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma, posvyashchennogo 85–letiyu so dnya rozhdeniya zasluzhennogo deyatelya nauki i tekhniki RF, professora V.G. Zubchaninova. FGBOU VPO «Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet». – 2015. – S. 59–65.

**Malinin Vladislav Georgiyevich**  
Oryol State Agrarian University  
Doctor of physico–mathematical sciences, Professor of «Engineering graphics and mechanics» department  
Oryol, Generala Rodina street, 69  
E–mail: malinin.mvg@yandex.ru

**Mussaui Yusef Yussefovich**  
Oryol State Agrarian University  
Post–graduate student  
Oryol, Generala Rodina street, 69  
E–mail: yusmus@yandex.ru

**Trifonov Yevgeniy Andreyevich**  
Oryol State Agrarian University  
Engineer  
Oryol, Generala Rodina street, 69  
E–mail: trifonovzhenua@yandex.ru

# **КОНСТРУИРОВАНИЕ,** **РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ**

УДК 621.7.043

В.А. ГОЛЕНКОВ, С.И. ВДОВИН, О.В. ДОРОФЕЕВ, Н.В. ТАТАРЧЕНКОВ, Е.В. ДЖАМЦ

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ГИБКИ ТРУБ НАМАТЫВАНИЕМ**

*В работе представлено описание экспериментальной установки процессом гибки труб намотыванием. Установка предназначена для гибки алюминиевых труб намотыванием по круглому копиру с различной установкой дорна (опережающей или отстающей) и без него. Данная установка применяется для научных исследований.*

**Ключевые слова:** гибка труб, круглый копир, дорн, намотывание, деформация, обкатывающий ролик, экспериментальная установка.

Сегодня металлические конструкции из гнутых труб широко используются в различных отрасли. Изгибание позволяет получить изделия нужной формы и необходимых размеров. Процедура представляет собой изгибание прямых труб под определенным углом и осуществляется путем сжатия внутренних и растяжения внешних слоев металла. Гибка труб по схеме, называемой намотыванием, является основным способом получения заготовок трубопроводов, содержащих прямые и изогнутые участки. Последние образуются поочередными поворотами круглого инструмента (копира) с замком для крепления заготовки, концевая часть которой удерживается от вращения направляющим устройством. Технические требования к трубопроводам регламентируют предельно допустимые показатели утонения стенки трубы и искажения формы (овализацию) поперечного сечения, приобретаемые в процессе гибки. Отмечается их систематическое ужесточение. Например, в котлостроении Германии лимит овальности изогнутых труб уменьшен в 1950 году с 15% до 12% и в дальнейшем доведен до 10%, а для определенной группы изделий до 5% [1]. В отечественном судостроении и авиастроении, по данным [2, 3], этот показатель ограничен значениями  $\pm 8\%$ , а для особо ответственных трубопроводов [3]  $\pm 2\%$ . Соблюдение требований к форме сечений достигается применением наполнителей или установкой дорна, поддерживающего стенку трубы изнутри. Эффект поддержки зависит от позиционирования дорна относительно оси копира, так что в принципе можно полностью исключить уменьшение высоты проходного сечения, но при этом утонение стенки нередко оказывается чрезмерным, вплоть до разрыва. Имеющиеся практические сведения по утонению стенки и овализации сечений изогнутых труб недостаточны для обобщения. Не определены области применения дорнов различной формы, как и бездорновой гибки. Теоретические разработки ограничиваются абстрактной схемой изгиба (труды Б.С.Билобрана, М.Н.Горбунова, В.П.Лукьянова, М.И.Лысова, Е.Н.Мошнина). Исключением является конечно-элементное моделирование (K. Pan, K.A. Stelson) переходного участка, на котором кривизна оси трубы, наматываемой на копир, возрастает от нуля до конечного значения. Результаты экспериментов, опубликованные зарубежными и отечественными специалистами (W.-D. Franz, В.П. Лукьянов, И.И. Маткава и др.), недостаточно информативны из-за отсутствия исчерпывающих сведений о гибочном инструменте и не всегда достоверны. Например, изменение толщины стенки трубы определяется по размерам делительной сетки на внешней поверхности без учета изменения ее кривизны, что может приводить к грубым ошибкам.

Слабая изученность технологического изгиба труб и отсутствие методик инженерного расчета данного процесса находятся в противоречии с актуальностью проблемы надежности трубопроводов и безопасности технических систем транспортного, энергетического и другого назначения.

В основу большинства станков для холодной гибки труб положена схема так называемого намотывания на круглый вращающийся копир (диск) [4, 5]. По контуру копира выполнено желобообразное углубление, охватывающее сечение изогнутой трубы приблизительно по половине периметра. Цилиндрическая часть желоба служит для

прикрепления заготовки 1 к копиру 2, с противоположной стороны ее охватывают зажим 3 и ложемент-ползун 4, последний перемещается пассивными силами трения либо принудительно – для создания активных сил трения, рисунок 1.

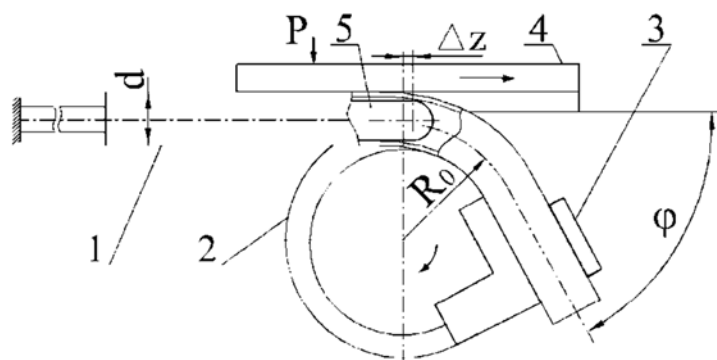


Рисунок 1 – Гибка трубы наматыванием на поворотный копир

Отношение радиуса гибки  $R_0$  к диаметру трубы  $d$  обычно не превышает 3...3,5; при  $R_0/d > 5$  гибка по копиру становится экономически невыгодной из-за увеличения размеров оборудования и оснастки [4].

Тонкостенные трубы гнут с поддержкой стенки трубы дорном 5 (рисунок 1), имеющим сферическую или ложкообразную законцовку [1, 5].

Наматывание на копир толстостенных труб может сопровождаться нагружением их осевой сжимающей силой, соответствующее бустерное устройство присоединяется к концу заготовки либо к ее участку, сохраняющему контакт с ползуном 4 (рисунок 1) во время поворота копира [5]. Толкающее воздействие бустера разгружает момент, прикладываемый к валу копира, уменьшает соотношение растягивающих и сжимающих деформаций гибки в пользу последних. В результате уменьшается не только утонение стенки трубы, но и искажение проходного сечения.

Наиболее высокие требования к изогнутому трубопроводу предъявляют автомобильная и аэрокосмическая промышленности. Помимо этого, трубопроводы, изгибаемые в автомобильной (например, трубопроводы системы выпуска отработанных газов СВОГ), и в авиационной промышленности, обладают крайне сложной геометрией, в которой используется множество радиусовгиба, зачастую отсутствуют прямолинейные участки между сгибами, и используют сложные для деформации материалы, такие как коррозионностойкую сталь, сплавы титана или жаропрочные стали. При этом не допускаются дефекты гибки: гофрообразование, следы на поверхности трубы, остающиеся от прижимов, утонения стенки. Для решения этих задач требуются очень современное и технологичное оборудование.

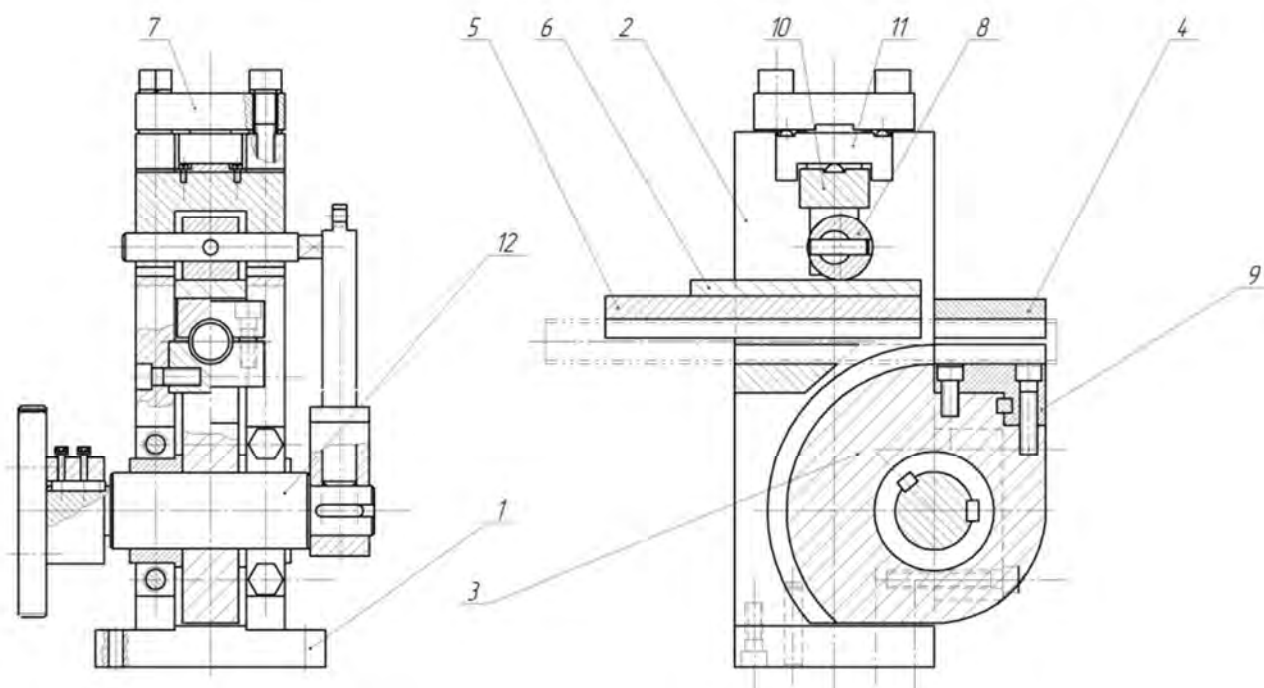
Для исследования и совершенствования технологии гибки труб наматыванием с дорном и без, была спроектирована и изготовлена опытная установка для гибки труб диаметром 30...32 мм наматыванием на копир радиуса 105 мм по дну его желоба. При конструировании исходили из возможности ее работы в режиме ручной гибки и деформации труб из сплава Д16 и стали 20 с наружным диаметром  $d$  и толщиной стенки  $t$ : 30х1,8 мм и 32х3 мм. Радиус копира по дну желобообразной канавки 105 мм в пересчете на радиус изогнутой оси трубы примерно равен 120 мм, или около  $4d$ . Такое соотношение выбрано из следующих соображений:

- исключается потеря устойчивости вышеуказанных труб (гофрообразование);
- разрыв стенки маловероятен даже при установке дорна с максимальным опережением, предотвращающей уменьшение высоты сечения изогнутого участка

Сборочный чертеж узла гибки и фотография показаны на рисунке 2 и рисунке 3.

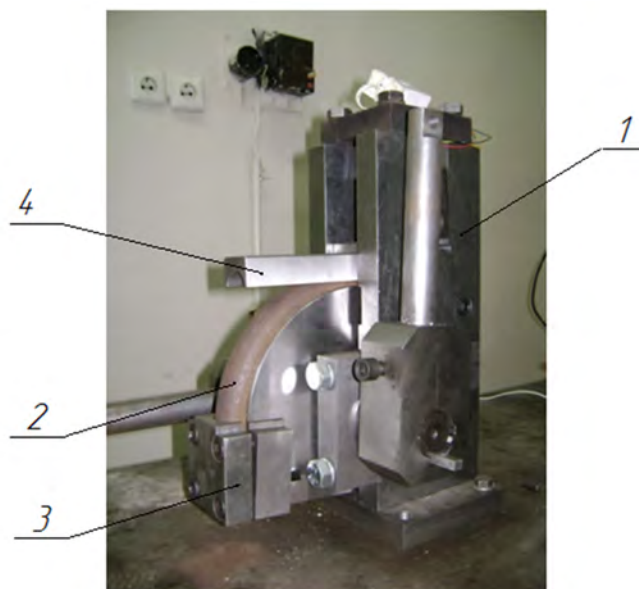
Основанием узла служит плита 1, на которую крепятся боковые стойки 2. Между ними на валу 12 через шпоночное соединение крепится копир 3, на котором находится прижим 9 с прихватом 4. Сверху стойки скрепляет пластина 7. Прижим 5 не дает «вывернуться» трубе, а прокладка 6 служит для передачи усилия гибки от прижима 5 на эксцентриковую втулку 8.

По прокладке 6 прижим 5 проскальзывает так как труба при изгибе как бы его захватывает за собой. Между эксцентриковой втулкой 8 и пластиной 7 находятся две балки 10 и 11. Балку 10 непосредственно поджимает сама втулка 8, а на балке 11, на её верхней поверхности приклеены тензодатчики, подключенные по мостовой схеме. Измерение упругих деформаций изгиба балки позволяет определять силу через тарировочную таблицу и рассчитывать момент на валу копира.



**Рисунок 2 – Узел гибки:**

1 – плита, 2 – стойки боковые, 3 – копир, 4 – прихват, 5 – прижим, 6 – прокладка, 7 – пластина, 8 – втулка эксцентриковая, 9 – прижим, 10 – балка, 11 – балка, 12 – вал



**Рисунок 3 – Узел гибки с согнутой трубой из стали 20:**

1 – узел гибки, 2 – изогнутая труба, 3 – прихват, 4 – прижим

Для уменьшения овальности сечений используют дорны поддерживающие стенку изгибаемой трубы изнутри. Они также препятствуют потере устойчивости стенкой в области сжимающих деформаций  $\varepsilon_z$ , что делает их применение целесообразным при гибке тонкостенных труб  $t/d \leq 0,06$  [6]. Конструкции дорнов различны, область применения каждой

из них, в зависимости от относительного радиуса гибки  $R_0/d$  и отношения  $d/t$  может устанавливаться отраслевыми стандартами, в частности ОСТ.95097–90, рисунок 4.

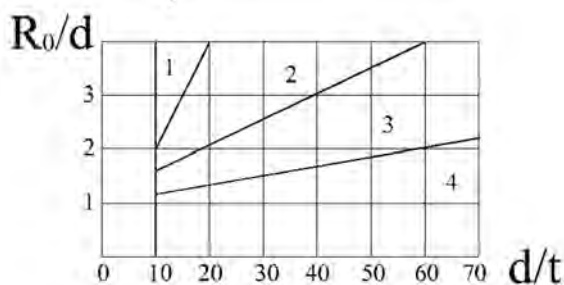


Рисунок 4 – Области гибки труб:

1 – без дорна; 2 – с шарообразной законцовкой дорна; 3 – с ложкообразным и 4 – с шарнирным дорнами

Наибольшее применение находят дорны, закругленные полушарием, они более универсальны, по сравнению с ложкообразными, которые изготавливаются не только для определенного внутреннего диаметра трубы, но и для конкретного радиуса гибки. На рисунке 5 показан дорн, продвинутый до упора в заранее изогнутую трубу; при таком положении он не будет оказывать влияния на уменьшение высоты сечений при гибке следующих заготовок; координата риски, проходящей по границе сферы, обозначена  $z_{д0}$ .

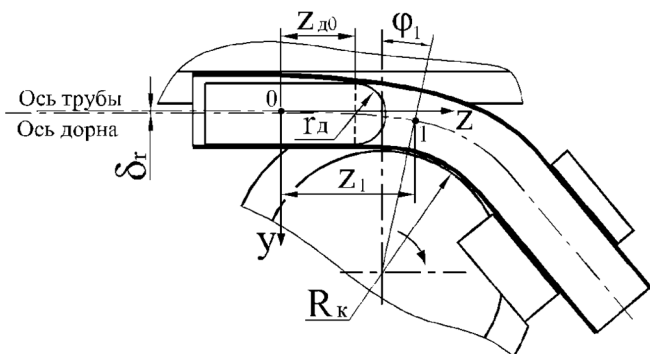


Рисунок 5 – Исходная установка дорна с недоходом риски до оси копира



Рисунок 6 – Чертеж дорна

Из типовых форм жесткого дорна выбрана слабо коническая со сферической законцовкой, рисунок 6.

Значение  $\Delta Z$  (рисунок 1) показывает на сколько отстает или опережает контрольная риска дорна ось копира.

При проведении экспериментальных исследований по выше указанной схеме получили следующие результаты сведенные в таблицу 1.

Таблица 1 – Данные результатов опытов

№ П/П	№ трубы	Опережение дорна, мм	Показание подачи	H, мм	L, мм
1	11	—	Без дорна	26,2	32,3
2	7	–4	86,2	27,2	32
3	6	–2	86,4	27,65	32
4	5	0	86,6	27,85	31,85
5	4	2	86,8	—	—
6	3	4	87,0	28,3	31,5
7	2	6	87,2	28,8	31,35
8	1	8	87,4	29	31,2
9	8	10	87,6	29,25	31

Из таблицы видно, что труба под номером 7 имеет наибольшую овализацию по сравнению со всеми образцами, а труба под номером 8 наименьшую овализацию.

На рисунках 7 и 8 приведены графики гибки труб наматыванием.

Полученные графики не однородны, так как при гибке ручным способом отсутствует возможность плавного перемещения копира, что ухудшает повторяемость результатов.

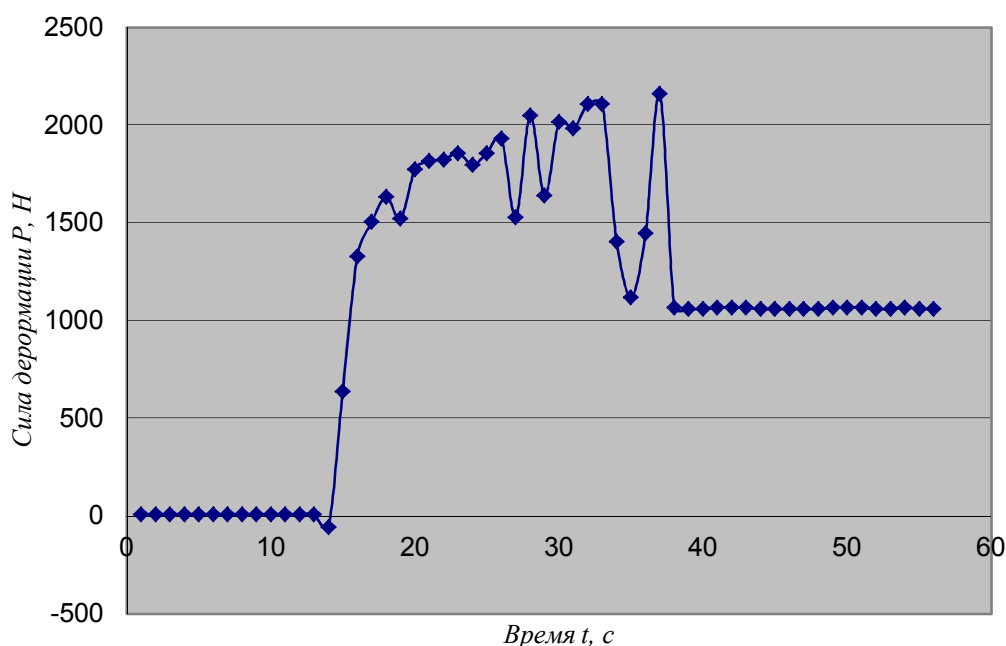


Рисунок 7 – График силы деформирования трубы №7 с отставанием дорна равное 4мм

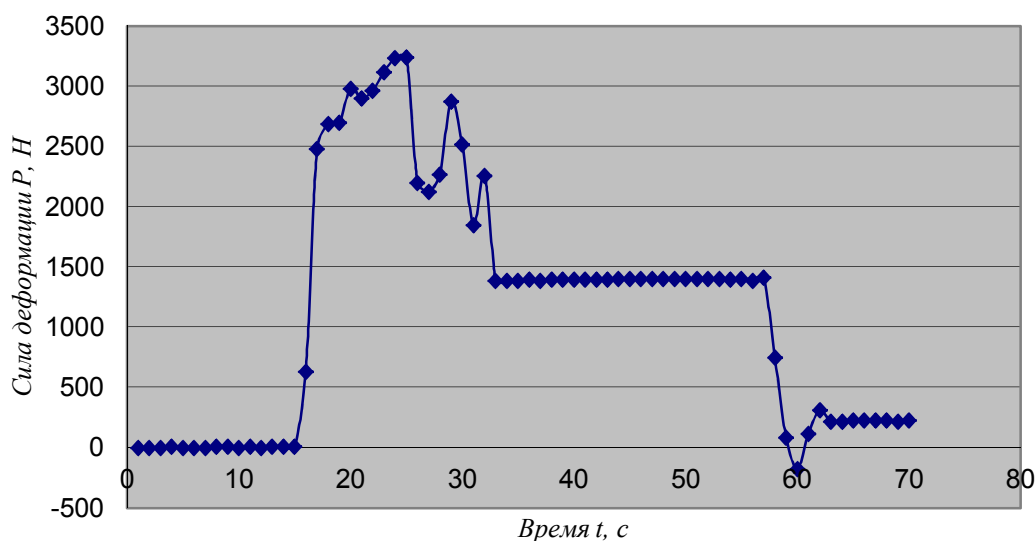


Рисунок 8 – График данных Microsoft Excel трубы №8 с опережением дорна равное 10мм

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования гибки труб по указанной схеме показали [7] перспективность ее применения, однако современной производство требует наличие систем автоматизации и управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Franz, W.–D. Maschinelles Rohrbiegen. Verfahren und Maschinen / W.–D. Franz. – Düsseldorf: VDI–Verlag, 1988. – 237 s.
2. Марьин, Б.Н. Изготовление трубопроводов гидрогазовых систем летательных аппаратов / Б.Н.Марьин, В.М.Сапожников, Ю.Л.Иванов и др. – М.: Машиностроение, 1998. – 400 с.
3. Лукьянов, В.П. Штамповка, гибка деталей для сварных сосудов, аппаратов и котлов / В.П. Лукьянов, И.И. Маткава, В.А. Бойко. – М.: Машиностроение, 2003. – 512 с.



4. Гальперин, А.И. Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопроводов / А.И. Гальперин. – М.: НЕДРА, 1983. – 203 с.
5. Никитин, В.А. Проектирование станков холодной и горячей гибки труб / В.А. Никитин. – СПб.: ОАО «ЦТСС», 2011. – 236 с.
6. Franz, W.–D. Das Kalt–Biegen von Rohren. Verfahren und Maschinen / W.–D. Franz. – Springer–Verlag. Berlin/Göttingen/Heidelberg/, 1961.
7. Вдовин, С.И. Деформации трубы при гибке моментом /С.И. Вдовин, В.Н. Михайлов, Н.В. Татарченков / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 2/274 (560). – С. 62– 65.

**Голенков Вячеслав Александрович**  
Приокский государственный  
университет, г. Орел  
Доктор технических наук, профессор,  
президент  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

**Вдовин Сергей Иванович**  
Приокский государственный  
университет, г. Орел  
Доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Автоматизированные процессы  
и машины бесстружковой  
обработки материалов»  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

**Дорофеев Олег Васильевич**  
Приокский государственный  
университет, г. Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры  
«Автоматизированные процессы  
и машины бесстружковой  
обработки материалов»  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

**Татарченков Николай Владимирович**  
Приокский государственный университет, г. Орел  
Учебный мастер кафедры «Автоматизированные  
процессы и машины бесстружковой обработки  
материалов»  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

**Дзамц Екатерина Викторовна**  
Приокский государственный университет, г. Орел  
Аспирантка кафедры «Автоматизированные процессы и  
машины бесстружковой обработки материалов»  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

---

V.A. KOLESNIKOV, S.I. VDOVIN, G.V. DOROFEEV, N.V. TATARCHENKOV, Ye.V. DZHAMTS

## EXPERIMENTAL LAUNCHER FOR FLEXIBLE PIPE WINDING

*The work describes the experimental installation equipment of winding tube bending. The equipment is designed for bending aluminum tubes for winding round cam with a different installation mandrel (leading or lagging) and without it. This equipment is used for scientific research.*

**Keywords:** tube bending, round cam, mandrel, winding, deformation, press roller, experimental installation.

## BIBLIOGRAPHY

1. Franz, W.–D. Maschinelles Rohr Biegen. Verfahren und Maschinen / W.–D. Franz. – Düsseldorf: VDI–Verlag, 1988. – 237 s.
2. Marin, B.N. Izgotovleniye truboprovodov gidrogazovykh sistem letatelnykh apparatov / B.N.Marin, V.M.Sapozhnikov, YU.L.Ivanov i dr. – М.: Mashinostroyeniye, 1998. – 400 s.
3. Lukyanov, V.P. Shtampovka, gibka detaley dlya svarnykh sosudov, apparatov i kotlov / V.P. Lukyanov, I.I. Matkava, V.A. Boyko. – М.: Mashinostroyeniye, 2003. – 512 s.
4. Galperin, A.I. Mashiny i oborudovaniye dlya izgotovleniya krivolineynykh uchastkov truboprovodov / A.I. Galperin. – М.: NEDRA, 1983. – 203 s.
5. Nikitin, V.A. Proyektirovaniye stankov kholodnoy i goryachey gibki trub / V.A. Nikitin. – SPb.: ОАО «ТСТСС», 2011. – 236 s.
6. Franz, W.–D. Das Kalt–Biegen von Rohren. Verfahren und Maschinen / W.–D. Franz. – Springer–Verlag. Berlin/Göttingen/Heidelberg/, 1961.
7. Vdovin, S.I. Deformatsii truby pri gibke momentom /S.I. Vdovin, V.N. Mikhaylov, N.V. Tatarchenkov / Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2009. – № 2/274 (560). – S. 62– 65.

**Golenkov Vyacheslav Aleksandrovich**  
Prioksky State University, Orel  
Dr., prof., president of university  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

**Vdovin Sergey Ivanovich**  
Prioksky State University, Orel  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor of «Automated processes  
and material handling machines»  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

**Dorofeev Oleg Vasilevich**  
Prioksky State University, Orel  
Ph.D., Associate Professor of  
«Automated processes and material  
handling machines»  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

**Tatarchenkov Nikolay Vladimirovich**  
Prioksky State University, Orel  
Educational master of faculty «Automated processes and  
material handling machines»  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

**Dzhamc Ekaterina Viktorovna**  
Prioksky State University, Orel  
Postgraduate student «Automated processes and material  
handling machines»  
E-mail: da\_shy@inbox.ru



## NURBS–АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

*На широком классе материалов тестируется метод аппроксимации экспериментальных кривых упрочнения, основанный на дробно–рациональных В–сплайнах (NURBS–функциях). Ограничиваясь лишь тремя опорными точками и кривизной, задаваемыми в сумме шестью параметрами, можно, тем не менее, получать хорошие приближения экспериментальных данных. Рассматриваются как кривые на конечном интервале деформаций, так и кривые с линейной асимптотикой на бесконечности, причём в последнем случае для определения точки перехода кривой в линейный режим её удобно представить в приведённых координатах.*

**Ключевые слова:** деформационное упрочнение, кривая упрочнения, сплайн–аппроксимация, дробно–рациональный сплайн.

Статья является продолжением работы, начатой авторами в [1, 2] и демонстрирует практическое применение полученных там результатов. Напомним постановку задачи. Как известно, при решении упругопластических задач необходимо знать закон упрочнения материала. Поскольку современная физика не может предложить строго обоснованный закон упрочнения материалов в общем случае, то при решении практических задач приходится довольствоваться либо приблизительными аналитическими зависимостями [3], либо экспериментальными кривыми упрочнения, задаваемыми по точкам. Таким образом, для различных материалов форма представления закона упрочнения может существенно различаться, что усложняет работу с базой данных, хранящей свойства материалов. Кроме того, поточечное хранение экспериментальных кривых является далеко не самым экономным. В этой связи поиск универсальной компактной формы представления кривой упрочнения материала является актуальной задачей. В [1, 2] предложена аппроксимация на основе NURBS (nonuniform rational B–spline) функций, обычно используемых в машинной графике для представления кривых линий и искривлённых поверхностей [4]. Настоящая статья целиком посвящена тестированию предложенной аппроксимации на широком классе материалов.

Все экспериментальные данные взяты из справочника [5]. Исследуемые кривые отобраны по следующим критериям: 1) отчётливо виден начальный предел текучести; 2) сложная форма кривой, определяемая по значительному изменению модуля упрочнения; 3) для кривых, аппроксимируемых на бесконечном интервале, должна отчётливо прослеживаться линейная асимптотика – выход на режим либо идеальной пластичности, либо линейного упрочнения. В зависимости от ситуации используются следующие меры деформации [5]: логарифмическая  $\varepsilon$ , относительная  $q$ , а также сдвиговая  $\gamma$ . Предел текучести  $\sigma_s$  на всех рисунках, за исключение 3 последних, выражен в [кгс/мм<sup>2</sup>].

Перед тем как перейти к изложению основного материала статьи, следует напомнить некоторые результаты работ [1, 2]. Пусть  $\mathbf{p}=\mathbf{p}(u)$ ,  $0 \leq u \leq 1$  – вектор–функция в плоскости  $(\varepsilon, \sigma)$ , используемая для аппроксимации кривой упрочнения  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ . Считаем, что  $\mathbf{p}(u)$  задана в виде NURBS–сплайна 2–го порядка (переход к сплайнам более высокого порядка существенно усложняет вычисления, а повышение точности аппроксимации оказывается при этом излишним, как это будет видно из представленных ниже результатов):

$$\mathbf{p}(u) = \frac{h_0 \mathbf{p}_0 N_{0,3}(u) + h_1 \mathbf{p}_1 N_{1,3}(u) + h_2 \mathbf{p}_2 N_{2,3}(u)}{h_0 N_{0,3}(u) + h_1 N_{1,3}(u) + h_2 N_{2,3}(u)},$$

где  $N_{0,3}(u) = (1-u)^2$ ,  $N_{1,3}(u) = 2u(1-u)$ ,  $N_{2,3}(u) = u^2$  – полиномы Бернштейна, а полюса  $\mathbf{p}_0(0, \sigma_0)$ ,  $\mathbf{p}_1(\varepsilon_1, \sigma_1)$ ,  $\mathbf{p}_2(\varepsilon_2, \sigma_2)$  определяются по экспериментальной кривой:  $\sigma_0$  –

начальный предел текучести,  $(\varepsilon_1, \sigma_1)$  – точка пересечения двух касательных, проведённых из концов кривой, а  $(\varepsilon_2, \sigma_2)$  – правый конец кривой. Весовые коэффициенты  $h_0, h_2$  полагаются равными 1, что обеспечивает прохождение кривой через полюса  $\mathbf{p}_0(0, \sigma_0)$ ,  $\mathbf{p}_2(\varepsilon_2, \sigma_2)$ , а коэффициент  $h_1$ , определяющий кривизну кривой, подгоняется визуально либо по какому-нибудь критерию. Для хранения данной кривой необходимо всего шесть величин  $\sigma_0, \varepsilon_1, \sigma_1, \varepsilon_2, \sigma_2, h_1$ , т.е. возможно создание справочника или базы данных, занимающих минимальный объем. Приведенные аппроксимации задают зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  параметрическим способом:  $\varepsilon = \varepsilon(u)$ ,  $\sigma = \sigma(u)$ . Однако при необходимости можно найти и явную зависимость. Для этого необходимо вычислить обратную функцию  $u = u(\varepsilon)$  и подставить её в  $\sigma(u)$  (подробности в [1]). Модуль упрочнения вычисляется по формуле  $H'(\varepsilon) = d\sigma / d\varepsilon = (d\sigma / du) : (d\varepsilon / du)$  исходя из вышеприведённой аппроксимации.

Переходим к изложению основных результатов и начнём с кривых упрочнения, заданных на конечном интервале (рисунки 1 – 6). С целью экономии места таблицы параметров NURBS–сплайнов приведены прямо на рисунках.

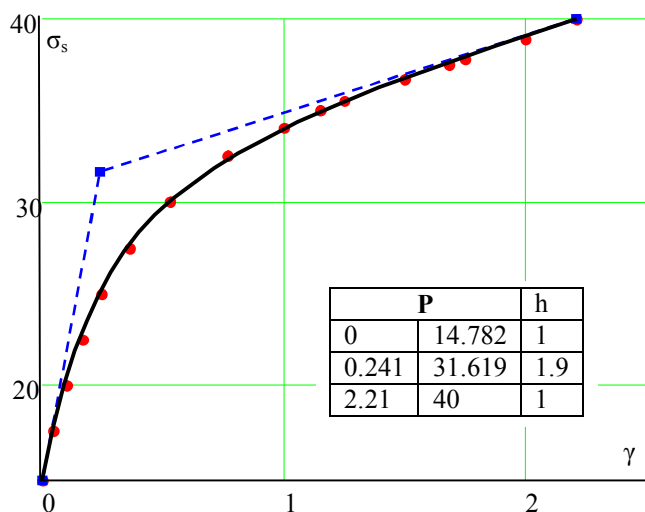


Рисунок 1 – Низкоуглеродистая сталь (C=0,06%) при кручении со скоростью  $0,12 \text{ с}^{-1}$  ( $t=78^\circ\text{C}$ )

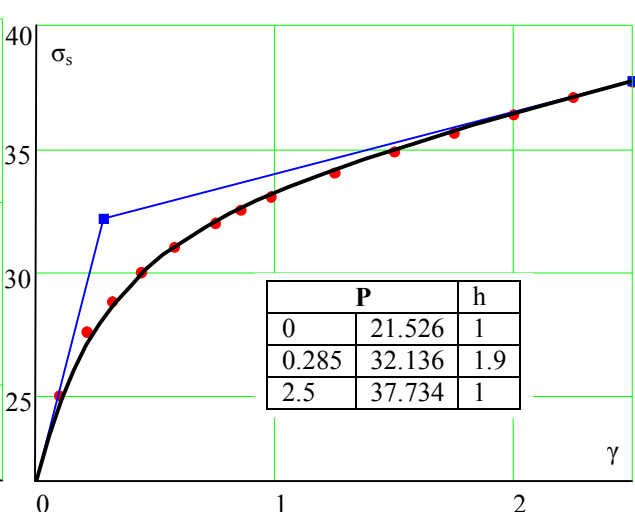


Рисунок 2 – Низкоуглеродистая сталь (C=0,06%) при кручении со скоростью  $2,4 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$

Переходим к кривым упрочнения, аппроксимируемым на неограниченном интервале, в предположении их линейной асимптотики на бесконечности. Важность этой задачи обусловлена тем, что в некоторых технологических процессах с большой деформацией её величина бывает заранее неизвестна, поэтому желательно иметь надёжную аппроксимацию, не ограничиваясь каким-то предельным значением деформации. В качестве первого шага предлагалось привести исходный график к стандартному виду, перейдя к приведённым величинам деформации и напряжения [2]:

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon / (\varepsilon + \varepsilon_1), \quad \tilde{\sigma} = (\sigma - \sigma_0) / (a\varepsilon + b - \sigma_0),$$

где  $\varepsilon_1$  – уже встречавшаяся выше характерная деформация,  $\sigma = a\varepsilon + b$  – асимптотика исходной кривой. Здесь исправлена допущенная в [2] по вине авторов опечатка: в знаменателе последней формулы отсутствовало слагаемое « $-\sigma_0$ ». Далее, по приведённой кривой  $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(\tilde{\varepsilon})$  предлагалось построить NURBS–аппроксимацию. Обработка экспериментальных данных показала, что уже на первом шаге формы кривых в приведённых координатах не сближаются, как это предполагалось в [2], а наоборот, ещё больше расходятся. Другим неожиданным результатом стало то, что эти формы группируются в 3 класса: прямолинейные, колоколообразные с единственной точкой перегиба, сложной формы с двумя и более точками перегиба. Все эти классы будут представлены в конце статьи на рисунках 21–23.

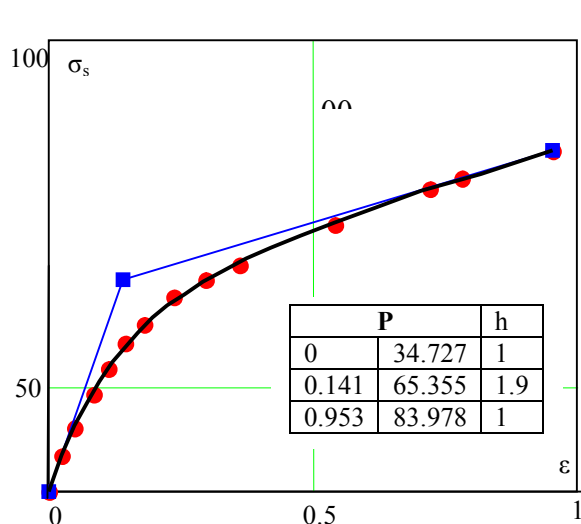


Рисунок 3 – Отожжённая сталь X10Cr13 при сжатии ( $t=20^{\circ}\text{C}$ )

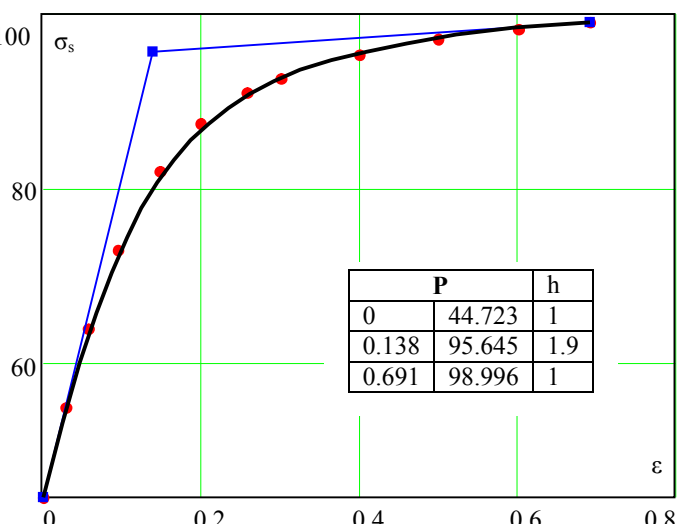


Рисунок 4 – Отожжённая сталь C45 при сжатии со скоростью  $90\text{ c}^{-1}$  ( $t=20^{\circ}\text{C}$ )

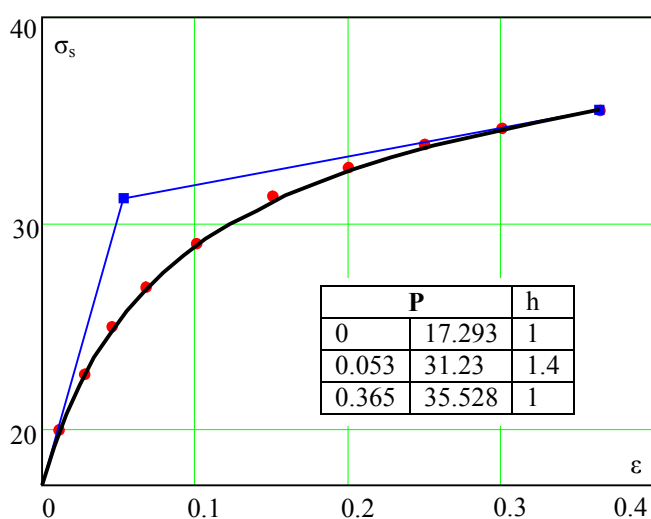


Рисунок 5 – Технически чистая медь, предварительно деформированная холодной осадкой до  $\epsilon=10\%$  ( $t=20^{\circ}\text{C}$ )

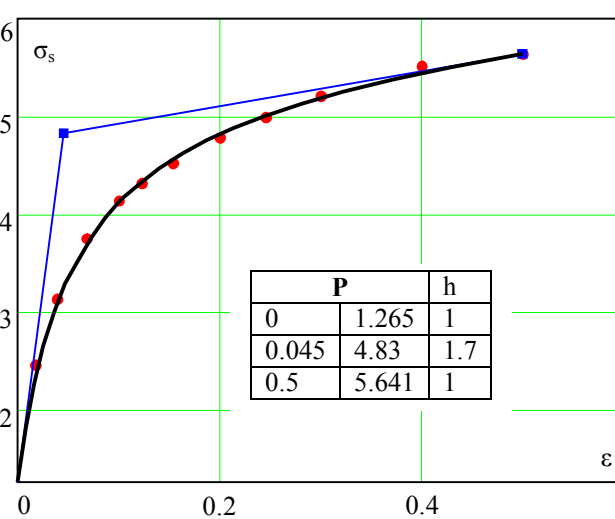


Рисунок 6 – Отожжённый алюминий с диаметром зерна 150 мкм при растяжении ( $t=80^{\circ}\text{C}$ )

Отыскав по приведённой кривой точку насыщения (т.е., точку перехода в линейный режим упрочнения, которая в переменных  $(\epsilon, \sigma)$  отчётливо видна) с координатами  $(\epsilon_2, 1)$ , можно построить NURBS- аппроксимацию исходной кривой на конечном интервале  $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_2$  и линейно продолжить её на бесконечный интервал  $\epsilon > \epsilon_2$ . Следующая серия кривых (рисунки 7 – 20) получена как раз по данной методике.

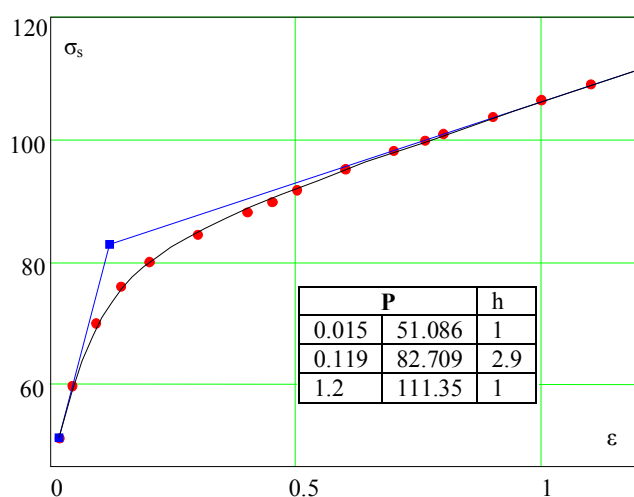


Рисунок 7 – Горячекатаная сталь 45

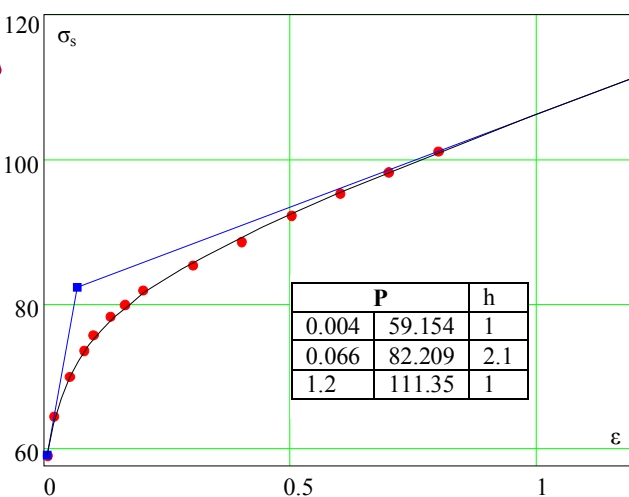


Рисунок 8 – Волооченая сталь 45 со степенью обжатия 0,13

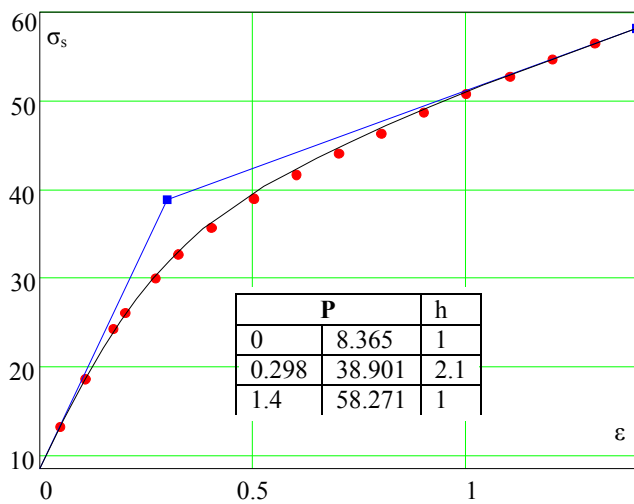


Рисунок 9 – Си-Л90 при растяжении ( $t=20^{\circ}\text{C}$ )

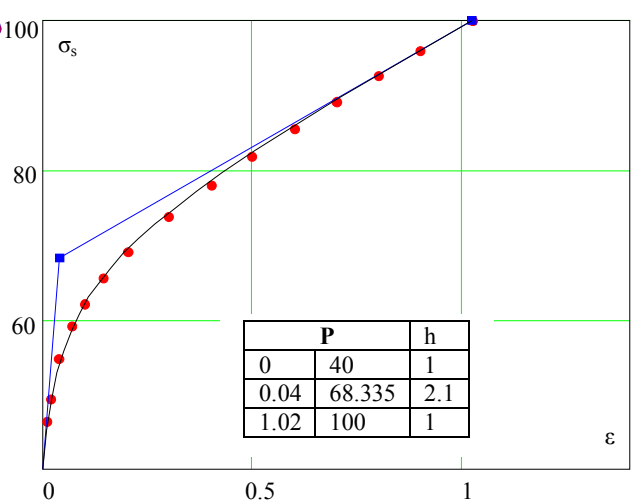


Рисунок 10 – Сталь 30 при растяжении ( $t=20^{\circ}\text{C}$ )

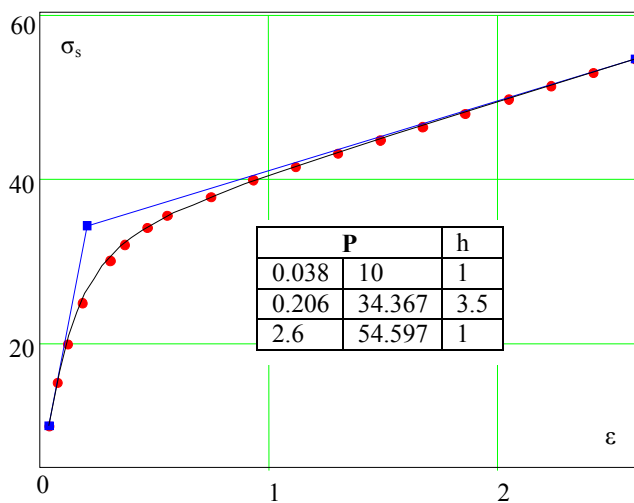


Рисунок 11 – Отожжённая медь М2 при сжатии ( $t=20^{\circ}\text{C}$ )

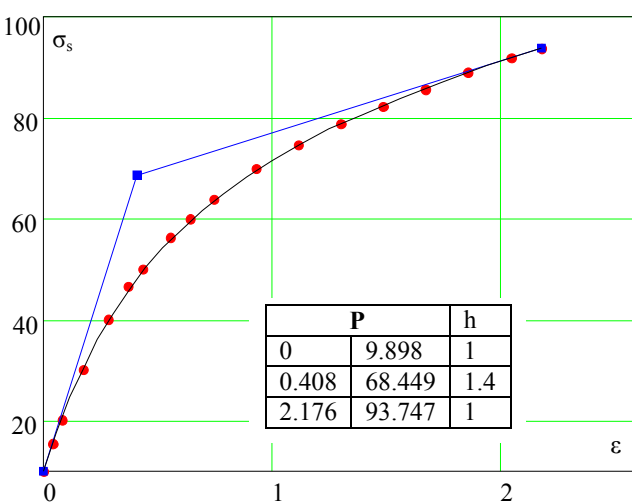


Рисунок 12 – Отожжённая латунь Л63 при сжатии ( $t=20^{\circ}\text{C}$ )

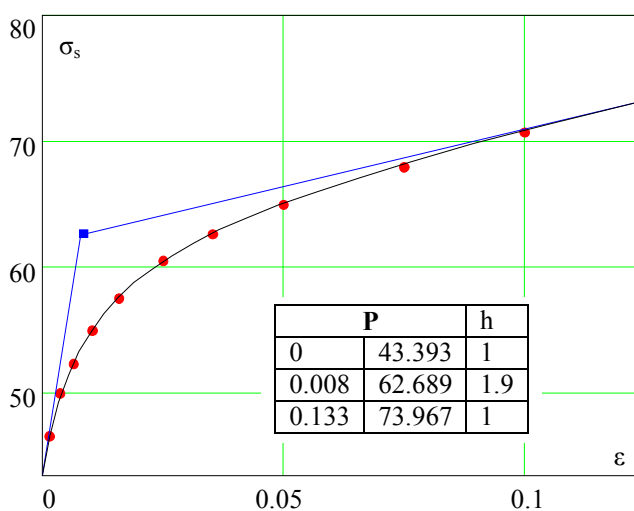


Рисунок 13 – Цирконий (99,7%) при растяжении со скоростью  $6,67 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$  ( $t=-196^{\circ}\text{C}$ )

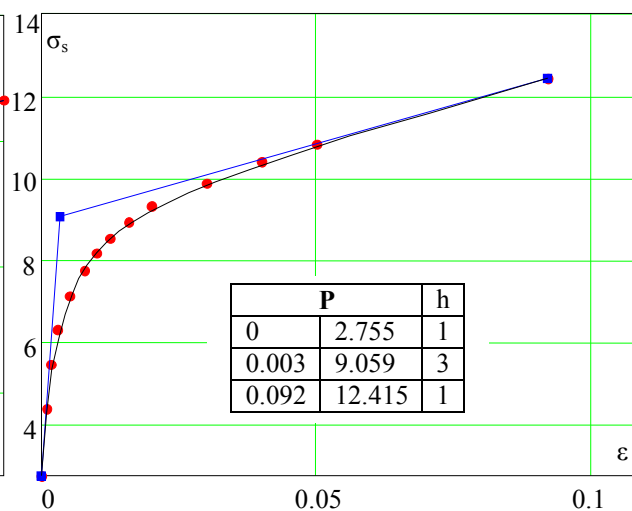
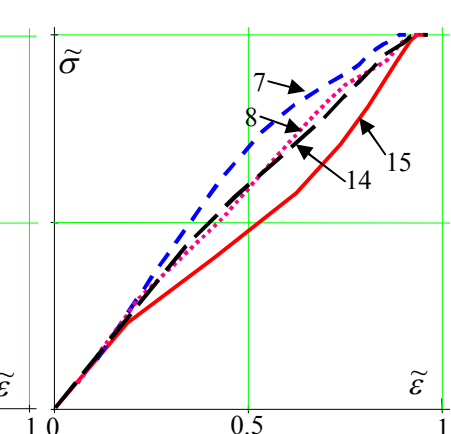
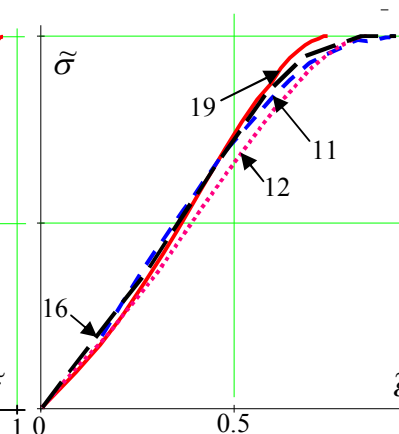
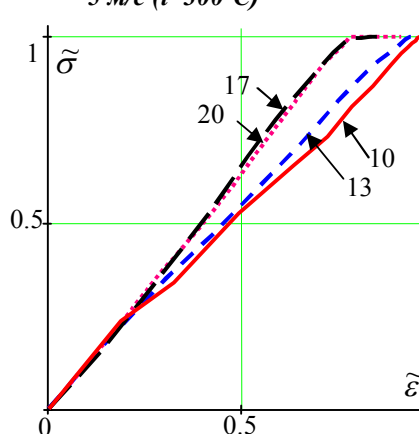
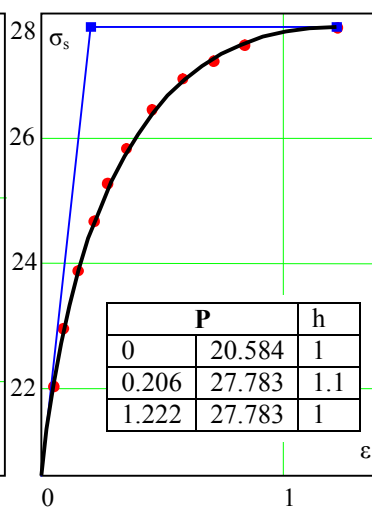
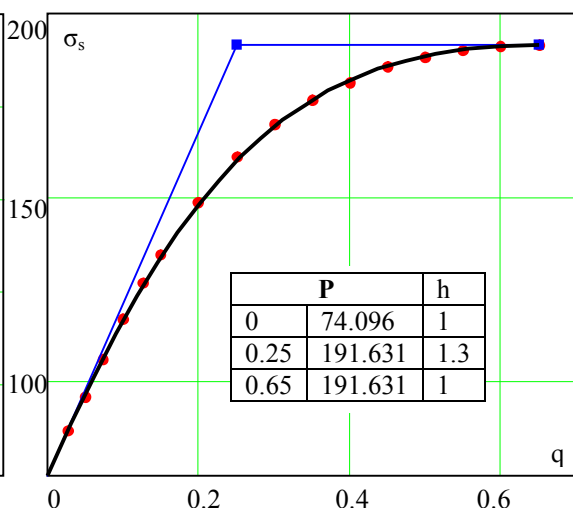
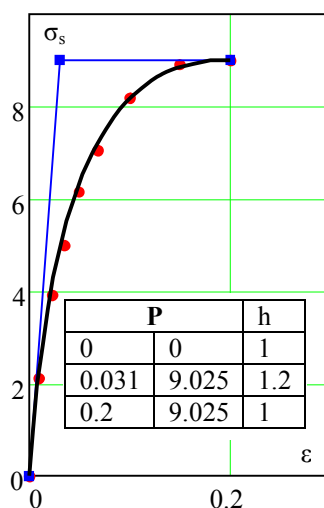
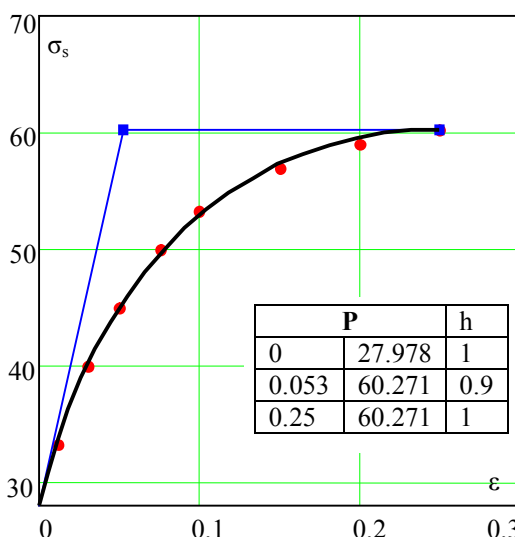
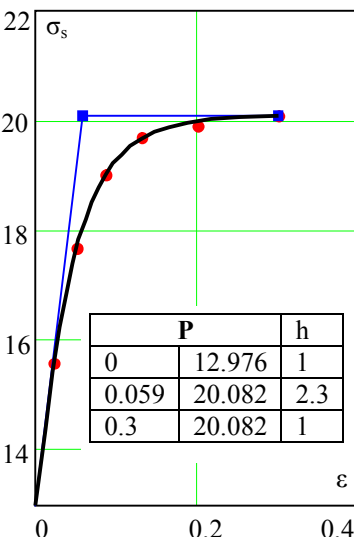
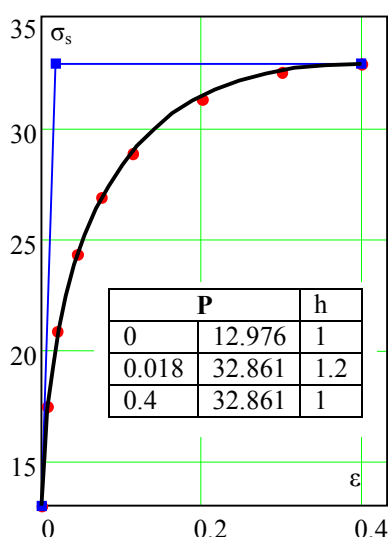


Рисунок 14 – Прессованный Zn 99,995 при растяжении ( $t=20^{\circ}\text{C}$ )



Ещё раз отметим, что на рисунках 7 – 20 показаны лишь начальные участки кривых, за которыми должны следовать бесконечные линейные участки, наклонные для рисунков 7 – 14 и горизонтальные для рисунков 15 – 20.

Результаты, представленные на рисунках 21 – 23 говорят о том, что кривые упрочнения группируются в классы, что, очевидно, обусловлено схожими механизмами деформации, однако данный вопрос требует отдельной проработки. Группировка по классам хорошо прослеживается именно в приведённых координатах, тогда как в исходных координатах она затушёвана. Интересно также отметить, что в одном классе могут оказаться кривые как с наклонной асимптотикой, так и горизонтальной.

Таким образом, практическое применение предложенной методики аппроксимации кривых упрочнения материалов показало высокую точность при минимальном объёме данных (всего 6 параметров), необходимых для хранения каждой кривой, а тестирование на широком классе экспериментальных зависимостей свидетельствует в пользу её универсальности. Достижимая при этом точность аппроксимации делает излишним переход к сплайнам более высокого порядка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фёдоров, Т.В. Аппроксимация экспериментальных кривых упрочнения неоднородными дробно-рациональными B-сплайнами / Т.В. Фёдоров // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 1 (303). – С. 64–68.
2. Фёдоров, Т.В. NURBS-аппроксимация экспериментальных кривых упрочнения с линейной асимптотикой / Т.В. Фёдоров, П.Г. Морев // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – 2013. – № 4. – С. 409–413.
3. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П.Б. Меллор / Пер. А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
4. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – Спб.: Питер, 2004. – 560 с.
5. Кроха, В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник / В.А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 157 с.

**Морев Павел Геннадьевич**  
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орёл  
Кандидат физико-математических наук, науч. сотр.  
лаб. новых материалов  
E-mail: paulorel@mail.ru

**Фёдоров Тимофей Васильевич**  
ФГБОУ ВПО Госуниверситет – УНПК, г. Орёл  
Кандидат технических наук, доц. каф. АВТОПЛАСТ  
E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

---

T.V. FEDOROV, P.G. MOREV

### AN APPROXIMATION OF STRAIN-STRESS CURVES, BASED ON NONUNIFORM RATIONAL B-SPLINE (NURBS). PRACTICAL IMPLEMENTATION

*An effective approximation by nonuniform rational B-spline (NURBS) for experimental stress-strain curves is tested on a broad class of materials. The spline is determined by only 6 parameters (3 poles and curve curvature), but, nevertheless, a good approximation of experimental data is provided. Both finite curves and infinite ones with linear asymptotic are considered and in the latter case it is convenient to represent an experimental curve in some special coordinates to determine the point of switch over a linear regime of hardening.*

**Keywords:** work hardening, stress-strain curve, spline-approximation, nonuniform rational B-spline.

### BIBLIOGRAPHY

1. Fedorov, S.V. Approssimatsiya eksperimentalnykh krivyykh uprochneniya neodnorodnymi drobnoratsionalnymi B-splaynami / T.V. Fedorov // Fundamentalnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 1 (303). – S. 64–68.
2. Fedorov, T.V. NURBS-approssimatsiya eksperimentalnykh krivyykh uprochneniya s lineynoy asimptotikoy / T.V. Fedorov, P.G. Morev // Izvestiya TulGU. Seriya Tekhnicheskkiye nauki. – 2013. – № 4. – S. 409–413.
3. Dzhonson, U. Teoriya plastichnosti dlya inzhenerov / U. Dzhonson, P.B. Mellor / Per. A.G. Ovchinnikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1979. – 567 s.
4. Li, K. Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE) / K. Li. – Spb.: Piter, 2004. – 560 s.
5. Krokha, V.A. Uprochneniye metallov pri kholodnoy plasticheskoy deformatsii: Spravochnik / V.A. Krokha. – M.: Mashinostroyeniye, 1980. – 157 s.

**Morev Pavel Gennadevich**  
VPO State University – ESPC, Orel  
Candidate of physical and mathematical sciences,  
scientific. et al. lab. new materials  
E-mail: paulorel@mail.ru

**Fedorov Timofey Vasilyevich**  
VPO State University – ESPC, Orel  
PhD, Assoc. cafes. AVTOPLAST  
E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 534–8

Р.И. НИГМЕТЗЯНОВ, С.К. СУНДУКОВ, Д.С. ФАТЮХИН

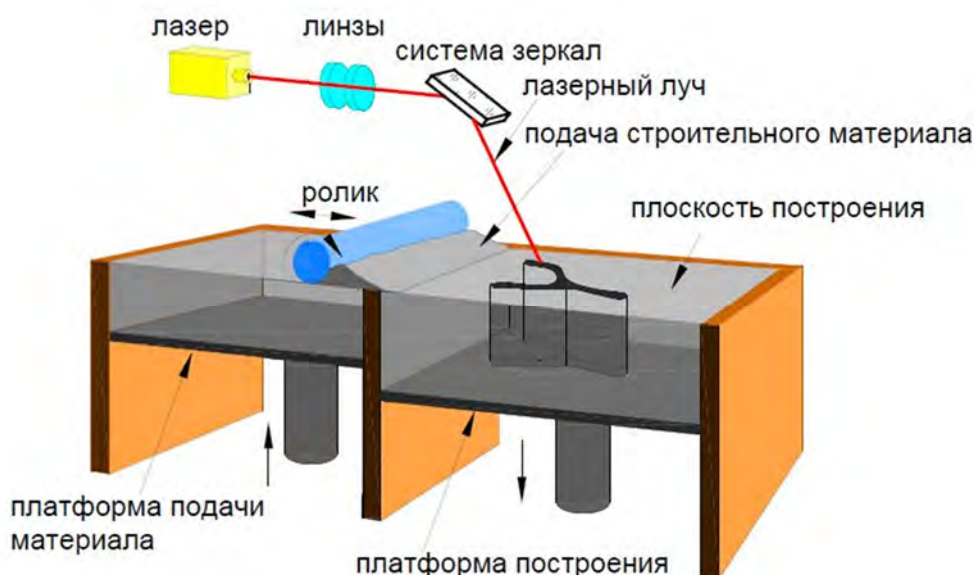
## **ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ**

*Аддитивные технологии позволяют производить изделия уникальной формы, которые невозможно изготовить традиционными технологиями. Главным недостатком аддитивных технологий является низкое качество поверхности получаемого изделия. В статье рассмотрено применение ультразвуковой жидкостной обработки с целью снижения параметров шероховатости таких изделий. Для оптимизации и повышения эффективности обработки предложены разработанные в МАДИ технологические установки.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, селективное лазерное плавление, поверхностный слой, ультразвуковая жидкостная обработка.

Аддитивные технологии – это производство изделий путём послойного добавления материала (наплавления или напыления порошка, добавление жидкого полимера или композита) [1].

Из широкого спектра аддитивных технологий с точки зрения машиностроения наиболее интересным является использование метода селективного лазерного плавления (СЛП), который за счёт высокой мощности лазера с небольшим фокусирующим пятном наилучшим образом подходит для изготовления изделий из металлических порошков (по сравнению с другими методами аддитивных технологий). Принципиальная схема реализации метода СЛП представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Принципиальная схема метода СЛП**

Металлический порошок на платформе подачи материала поднимается на определённую высоту, ролик разравнивает порошок по предварительно подготовленной платформе построения. Лазерное излучение по программе, сгенерированной из трёхмерной модели, избирательно плавит порошок. После селективного лазерного плавления первого слоя подложка опускается на заданную толщину слоя, далее устройством подачи



расстиляется новый слой порошкового материала, и процесс повторяется, пока деталь не будет закончена [2].

Такой метод изготовления деталей является альтернативой традиционному производству, основанному на удалении материала, и имеет ряд преимуществ: изготовление изделий любой (уникальной) формы; увеличение коэффициента использования материала; возможность создания полиматериальных изделий; уменьшение количества сборочных единиц [3].

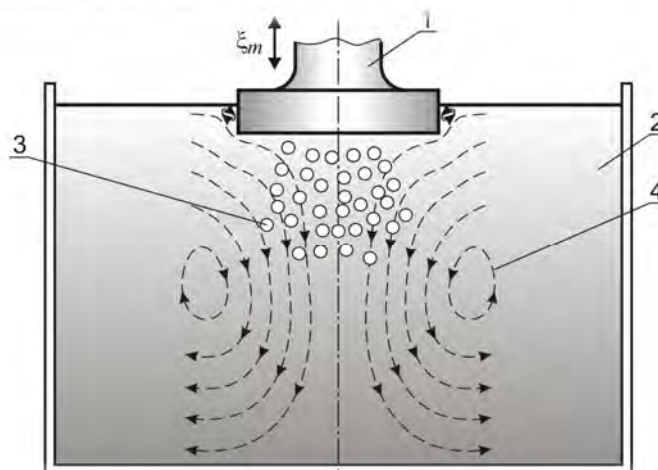
Несмотря на значительные преимущества СЛП, его применение ограничено вследствие невозможности создания надлежащей структуры синтезированного материала. Поверхность полученная СЛП, характеризуется неоднородным рельефом и большим количеством включений, образованных в результате разбрызгивания металла в ванне расплава. Также оксидные пленки, образующиеся на поверхности предыдущего прохода, могут не выйти на поверхность расплавленной ванны металла и остаться внутри объема, что приводит к образованию пористости.

Помимо этого к проблемам технологии СЛП относятся высокая конечная стоимость изделия, низкая производительность процесса, трудности удаления неспечённого порошка из узких каналов.

Таким образом, с помощью аддитивных технологий производится заготовка, которая требует дальнейшей обработки. И если внешние поверхности и отверстия с прямой осью симметрии возможно обработать традиционными способами, то для сложнопрофильных внутренних каналов и полостей, получение которых является главным преимуществом аддитивных технологий, требуется разработка новых способов обработки.

В лаборатории электрофизических методов обработки МАДИ с целью повышения качества поверхностей, обладающих сложной геометрией, предлагается использовать ультразвуковые технологии жидкостной обработки.

При введении в жидкость механических колебаний ультразвуковой частоты в ней возникает ряд эффектов, основными из которых являются кавитация и акустические потоки (рисунок 2) [4]. Захлопывающиеся и пульсирующие кавитационные полости осуществляют работу по изменению структуры и свойств поверхности обрабатываемого изделия. Акустические потоки обеспечивают перенос кавитационных полостей от торца излучателя и распределяют их по озвучиваемому объёму, что позволяет производить обработку поверхностей (внутренних и внешних) любой сложности.



**Рисунок 2 – Схема введения ультразвуковых колебаний в жидкость:**

*1 – излучатель, 2 – технологическая жидкость, 3 – зона развитой кавитации, 4 – акустические потоки*

При проведении экспериментальных исследований применялось два вида ультразвуковой жидкостной обработки: кавитационно–эрозионная (КЭО) и кавитационно–абразивная (КАО).

В качестве образцов использовались кубики 10x10x10 мм из коррозионно–стойкой стали РН–1, изготовленный на установке селективного лазерного плавления EOS M280.

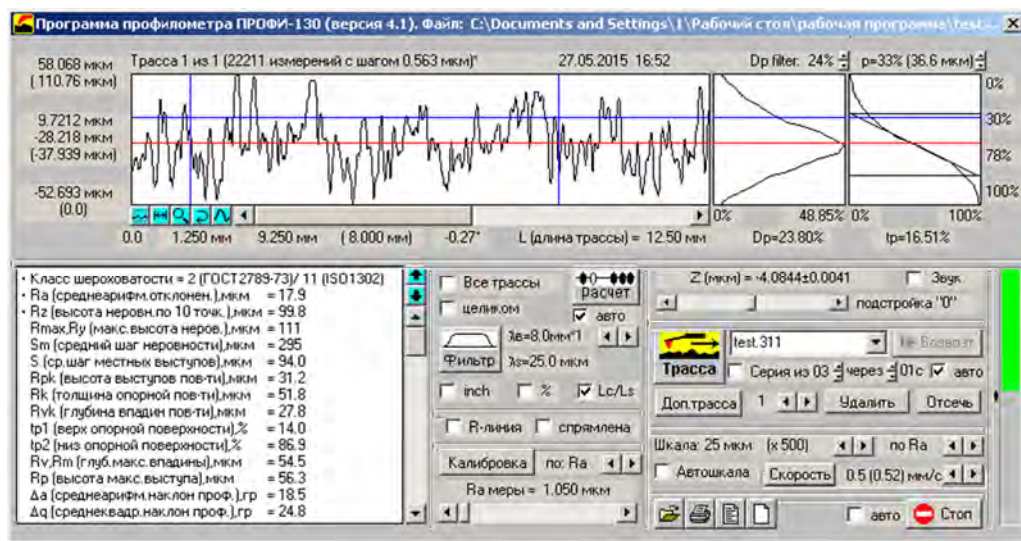


В связи с особенностями послойного производства изделия особую важность для исследований представляет его боковая поверхность, так как она будет являться поверхностью, образующей элементы и обладающей сложной (уникальной) геометрией. Поэтому при обработке образец располагался одной из боковых поверхностей перпендикулярно направлению распространения колебаний.

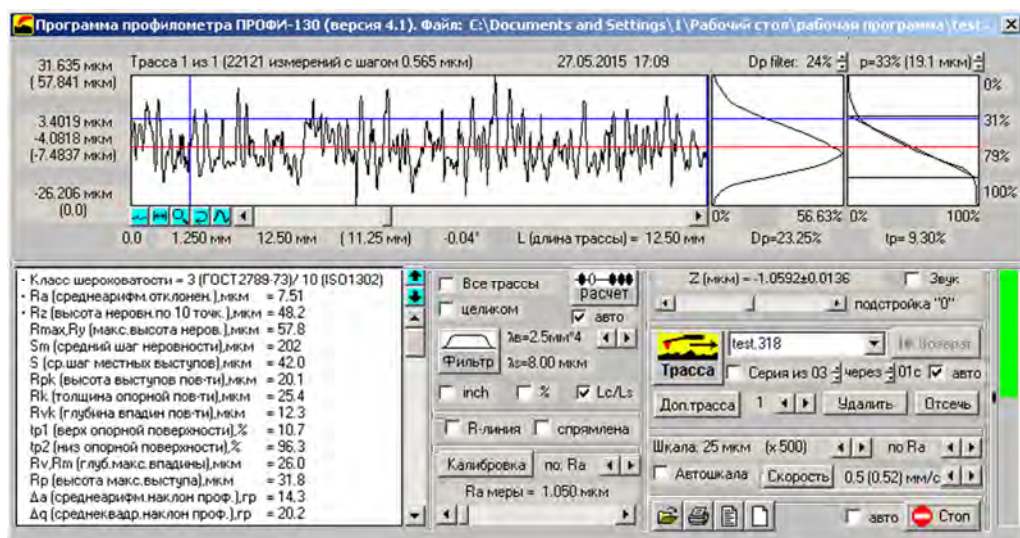
КЭО проводилось в течение 60 мин, КАО – 5 мин.

По результатам экспериментов по обработке стали КЭО не привела к изменению шероховатости. При этом на поверхности образца прослеживались очаги эрозионного разрушения. Это объясняется тем, что образец после СЛП имеет структуру, обладающую крупными зёрнами и низкой кавитационной стойкостью.

Большую эффективность показал метод КАО. Обработка в течении 5 минут привела к значительному изменению шероховатости поверхности (рисунок 3): снижению высотных параметров ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ ) на 50–60%, уменьшению среднего шага неровностей  $Sm$  в 2 раза и увеличению опорной длины профиля на 10%.



а



б

Рисунок 3 – Профилограмма поверхности образца из стали РН-1:  
а – без обработки; б – после КАО

Это связано с тем, что механизм воздействия КАО на поверхность заключается в микрорежущем действии абразивных частиц, которые приобретают ускорение в результате

передачи импульса от ударных волн, акустических микро- и макротечений. При этом абразивные частицы защищают поверхность от прямого кавитационного воздействия и предотвращают эрозию поверхности.

Снижение параметров шероховатости положительно сказывается на таких свойствах как износостойкость, прочность, коррозионная стойкость и теплопроводность.

Для оптимизации и повышения эффективности ультразвуковой жидкостной обработки, в зависимости от сложности профиля обрабатываемого изделия и его размеров, целесообразно применять различное технологическое оборудование, в основе действия которого положен принцип управления геометрией (в основном увеличение объёма) зоны развитой кавитации.

Одним из путей увеличения объёма данной зоны является повышение площади излучающей поверхности. Так в МАДИ была разработана спаренная колебательная система (рисунок 4).

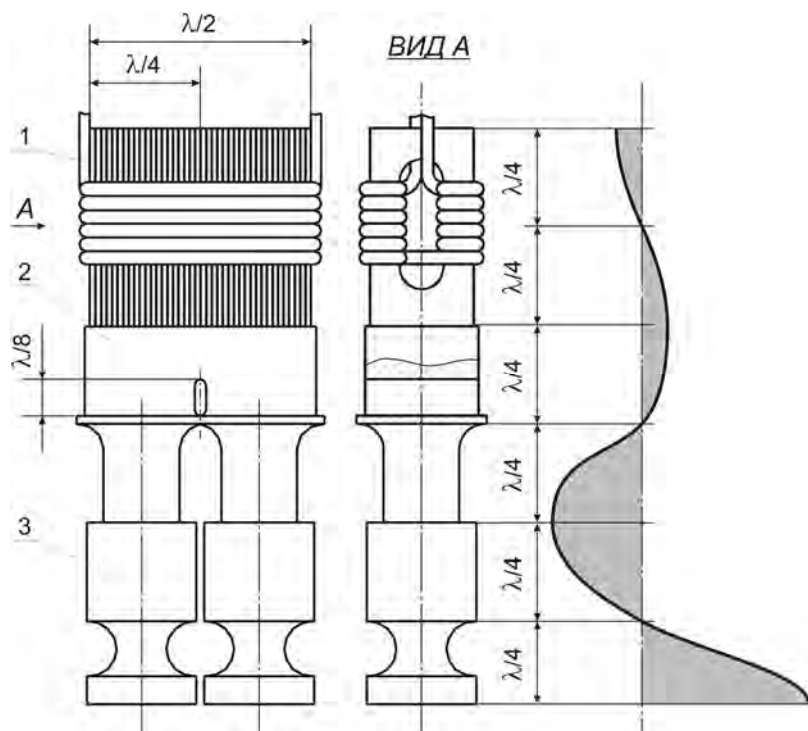


Рисунок 4 – Конструкция спаренной колебательной системы и эпюра изменения колебаний:  
1 – магнитострикционный преобразователь, 2 – волновод, 3 – концентратор



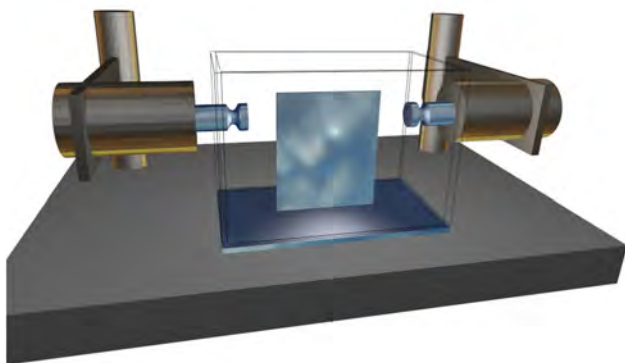
Рисунок 5 – Установка ультразвуковой очистки деталей машиностроения

Высота и ширина волновода соответствуют половине длины волны. К верхней части волновода припаян магнитострикционный пакет прямоугольного сечения, примерно равный удвоенной площади стержневой колебательной системы. В нижней части к нему

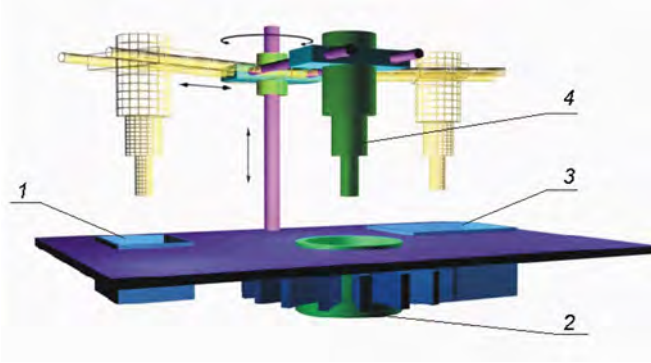
присоединены два концентратора. Такая система позволяет получить синфазные колебания при наличии площади излучения, вдвое большей по сравнению излучающей площадью обычной УКС с одним концентратором.

На основе разработанной колебательной системы создана установка ЛЭФМО–05 (рисунок 5).

С целью увеличения зоны эрозионного воздействия создаваемой стержневыми колебательными системами разработан способ обработки двумя соосно направленными концентраторами (рисунок 6).



*Рисунок 6 – Схема обработки двумя соосно–направленными излучателями*



*Рисунок 7 – Конструкция ультразвуковой установки:  
1,2,3 – пьезокерамические ванны, 4 – стержневая колебательная система*

Решение поставленной технической задачи достигается тем, что на изделие, помещенное в рабочую емкость с технологической жидкостью, воздействуют ультразвуковыми колебаниями от основного высокоамплитудного источника излучения с амплитудой колебательных смещений 15 ... 50 мкм, создавая направленный на изделие поток жидкости с кавитационными свойствами, одновременно на изделие направляют поток дополнительной энергии. В качестве дополнительной энергии используют энергию ультразвукового низкоамплитудного излучения, создающего совместно с излучением основного источника общую, удаленную от него зону устойчивого кавитационного воздействия на изделие за счет взаимодействия двух потоков акустического излучения. Реализация данной схемы позволяет повысить глубину эрозионного воздействия в 4 ... 5 раз [5].

Так как в качестве источника дополнительной энергии достаточно использование низкоамплитудной колебательной системы, то для конструкции установки целесообразно использовать пьезокерамические ванны. Конструкция разработанной установки представлена на рисунке 7.

Установка включает в себя одну стержневую колебательную систему, работающую на высокоамплитудном режиме, и три пьезокерамические ванны различных объемов. Данная установка оптимальна для ультразвуковой жидкостной обработки деталей, имеющих протяженные и сложнопрофильные внутренние каналы.

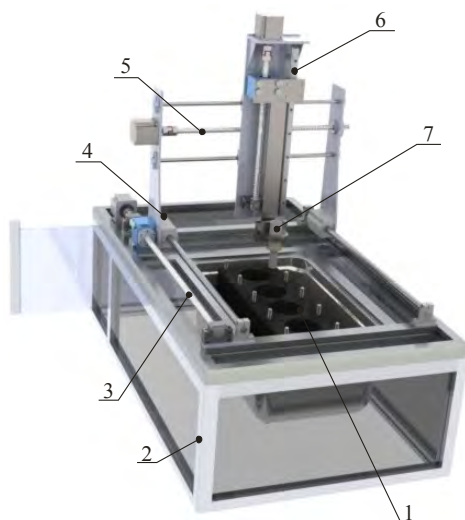
Эффективным способом увеличения объема зоны кавитационной обработки является перемещение колебательной системы по заданной траектории, повторяющей профиль поверхности изделия. Для обработки сложнопрофильных изделий, полученных аддитивными технологиями, требуется перемещение по 3–м координатам.

Конструктивно организация перемещения рабочего инструмента по 3–м координатам реализуется применением соответствующего числа приводов. Конструкция ультразвуковой установки координатной обработки ЛЭФМО–07 представлена на рисунке 8 [6].

Конструкция включает в себя каркас 2 из облегченного алюминиевого профиля, а также смонтированные на нём приводы продольного 4, поперечного 5 и вертикального 6 перемещения ультразвуковой колебательной системы 5.



Перемещение колебательной системы осуществляется по трем координатным плоскостям, реализуя стратегию обработки, разработанную в программном комплексе ГеММа – 3D по трехмерной модели объекта обработки, полученной на стадии проектирования в CAD–системе.



**Рисунок 8 – Установка координатной ультразвуковой обработки:**

1 – объект очистки; 2 – каркас нижнего блока установки, 3 – каркас верхнего блока установки, 4 – привод продольного перемещения излучателя, 5 – привод поперечного перемещения излучателя, 6 – привод вертикального перемещения излучателя, 7 – ультразвуковая колебательная система

Применение данной установки позволяет обрабатывать детали любых форм и габаритов.

Ещё одним способом интенсификации процессов ультразвуковой жидкостной обработки является использование концентраторов колебаний адаптивной формы (рисунок 9).



**Рисунок 9 – Концентраторы колебаний адаптивной формы**

При работе такие концентраторы стержневых колебательных систем излучают в жидкость не только продольные, но и сложные радиально–изгибные колебания, что позволяет за счёт геометрии концентратора получать кавитационную зону различной формы. В случае технологической целесообразности использование таких концентраторов повышает эффективность ультразвуковой обработки отдельных поверхностей деталей сложных форм.

Разработанный в МАДИ комплекс ультразвуковых технологий и оборудования позволяет добиться высокой эффективности жидкостной обработки сложнопрофильных мелко–, средне– и крупногабаритных изделий, полученных аддитивными технологиями.

Технологические методы обеспечения кавитационной активности при ультразвуковой высокоамплитудной обработкой по всему объёму жидкости позволяют обеспечивать повышение механических и геометрических свойств по всей поверхности обрабатываемых изделий. Применение разработанного комплекса существенно расширяет возможности и перспективы развития и повсеместного внедрения аддитивных технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wohlers, T. Wohlers report 2013: Additive manufacturing and 3D printing state of the industry / T. Wohlers // Annual worldwide progress report, Wohlers Associates, 2013. – 297 p.
2. Конов, С.Г. Перспективы применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве / С.Г. Конов, Д.В. Котобан, С.К. Сундуков, Д.С. Фатюхин // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 9. – С. 28–34.
3. Григорьев, С.Н. Перспективы развития инновационного аддитивного производства в России и за рубежом / С.Н. Григорьев, И.Ю. Смуров // Инновации. – 2013. – С. 18–22.
4. Приходько, В.М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте автотракторной техники / В.М. Приходько. – М.: Издательство «Техполиграфцентр», 2003. – 253с.
5. Fatyukhin, D.S. Ultrasonic cleaning equipment for automobile components / D.S. Fatyukhin // Russian engineering research. – 2012. – № 3. – p. 305–307.
6. Нигметзянов, Р.И. Разработка технологических установок для ультразвуковой очистки изделий автотракторной техники / Р.И. Нигметзянов, В.М. Приходько, С.К. Сундуков // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 10. – С. 22–26.

**Нигметзянов Равиль Исламович**  
Московский автомобильно–  
дорожный государственный  
технический университет (МАДИ)  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Технология  
конструкционных материалов»  
E-mail: lefmo@yandex.ru

**Сундуков Сергей Константинович**  
Московский автомобильно–  
дорожный государственный  
технический университет (МАДИ)  
Кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Технология  
конструкционных материалов»  
E-mail: sergey-lefmo@yandex.ru

**Фатюхин Дмитрий Сергеевич**  
Московский автомобильно–  
дорожный государственный  
технический университет  
(МАДИ)  
доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технология  
конструкционных материалов»  
E-mail: mitriy2@yandex.ru

R.I. AKHMETZYZANOV, S.K. SUNDUKOV, D.S. FATYUKHIN

## EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT ON SURFACE ROUGHNESS PARTS OBTAINED ADDITIVE TECHNOLOGY

*Additive technologies allow to produce unique product shapes that are impossible to manufacture with traditional technologies. The main drawback of additive technologies is the low surface quality of the resulting product. The article discusses the use of ultrasonic liquid processing to reduce roughness parameters of such products. To optimize and improve the efficiency of processing the developed in MADI technological installations.*

**Keywords:** additive technologies, selective laser melting, the surface layer, ultrasonic liquid processing.

## BIBLIOGRAPHY

1. Wohlers, T. Wohlers report 2013: Additive manufacturing and 3D printing state of the industry / T. Wohlers // Annual worldwide progress report, Wohlers Associates, 2013. – 297 p.
2. Konov, S.G. Perspektivy primeneniya ultrazvukovykh tekhnologiy v additivnom proizvodstve / S.G. Konov, D.V. Kotoban, S.K. Sundukov, D.S. Fatyukhin // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2015. – № 9. – С. 28–34.
3. Grigoryev, S.N. Perspektivy razvitiya innovatsionnogo additivnogo proizvodstva v Rossii i za rubezhom / S.N. Grigoryev, I.YU. Smurov // Innovatsii. – 2013. – С. 18–22.
4. Prikhodko, V.M. Ultrazvukovyye tekhnologii pri proizvodstve, ekspluatatsii i remonte avtotraktornoy tekhniki / V.M. Prikhodko. – М.: Izdatelstvo «Tekhpolygontsentr», 2003. – 253s.
5. Fatyukhin, D.S. Ultrasonic cleaning equipment for automobile components / D.S. Fatyukhin // Russian engineering research. – 2012. – № 3. – p. 305–307.
6. Nigmatzyanov, R.I. Razrabotka tekhnologicheskikh ustanovok dlya ultrazvukovoy ochistki izdeliy avtotratkornoy tekhniki / R.I. Nigmatzyanov, V.M. Prikhodko, S.K. Sundukov // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2015. – № 10. – С. 22–26.

**Akhmetzyanov Ravil Islamovich**  
Moscow State Automobile and Road  
Technical University (MADI)  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the  
Department «Technology of  
construction materials»  
E-mail: lefmo@yandex.ru

**Sundukov Sergey Konstantinovich**  
Moscow State Automobile and Road  
Technical University (MADI)  
Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor of the  
Department «Technology of  
construction materials»  
E-mail: sergey-lefmo@yandex.ru

**Fatyukhin Dmitriy Sergeyevich**  
Moscow State Automobile and Road  
Technical University (MADI)  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor of the Department  
«Technology of construction  
materials»  
E-mail: mitriy2@yandex.ru

УДК 621.9.047

Е.В. СМОЛЕНЦЕВ, А.М. КАДЫРМЕТОВ, М.В. КОНДРАТЬЕВ, Е.С. БОБРОВ

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

*Рассмотрена проблема повышения стойкости инструмента путем нанесения износостойких покрытий. Однако, отсутствие технологически обоснованных методов и оптимальных режимов затрудняют этот процесс. Предложен способ финишного плазменного упрочнения металлов, который позволяет оценить качество износостойких тонкопленочных покрытий и оптимизировать режимы нанесения.*

**Ключевые слова:** износостойкие покрытия; тонкопленочные покрытия; очистка заготовки; адгезия; когезия; микротвердость; режимы нанесения.

Развитие высокотехнологичного сектора экономики – неотложная государственная задача, без решения которой невозможно обеспечение технологической безопасности и независимости страны, в том числе развитие как наукоемких, так и традиционных ненаукоемких отраслей [1, 2]. Особенно актуальны эти вопросы стали в нынешних условиях санкций и экспортных ограничений [3]. По словам гендиректора «ВНИИинструмент» Г.В. Боровского, больше всего специалистов пугает масштабная зависимость от импорта режущего инструмента, такая ситуация может привести к остановке станков и коллапсу всей российской промышленности. Импортные поставки инструмента доходят до 95% [4].

В настоящее время, в условиях необходимости импортозамещения и развивающейся тенденции снижения производственных затрат на предприятиях машиностроительной отрасли актуальным направлением повышения экономической эффективности производства является повышение стойкости инструмента.

Среди множества направлений повышения стойкости металлорежущего инструмента к достаточно перспективным, ввиду сравнительно небольших затрат, многократности применения и простоты использования относится способ нанесения износостойких покрытий на режущую часть инструмента [5, 6].

Однако, ввиду большого разнообразия видов, форм, размеров и материала режущей части металлообрабатывающего инструмента использование методов нанесения износостойких покрытий, в том числе и алмазоподобных, сдерживается отсутствием технологически обоснованных методов и оптимальных режимов нанесения покрытий, контроля времени нанесения, толщины и качества получаемого покрытия. В процессе нанесения покрытий даже незначительные отклонения от оптимальных режимов работы могут существенно понизить качество покрытия [7, 8].

Предлагаемый способ финишного плазменного упрочнения позволит оценить качество нанесения износостойких тонкопленочных покрытий на режущую часть инструмента и оптимизировать режимы нанесения покрытий для достижения оптимального результата.

Для нанесения покрытия была выбрана установка финишного плазменного упрочнения ФПУ–114, позволяющая наносить износостойкое тонкопленочное алмазоподобное износостойкое покрытие на различные образцы. Покрытие на основе оксикарида кремния является продуктом плазмохимических реакций паров реагентов, прошедших через дуговой плазмотрон. Для получения покрытия в транспортирующий аргон добавлялись специальные присадки в виде суспензии.

Перед нанесением покрытия производилась предварительная очистка основы, её обезжиривание и нагрев.

В качестве наиболее влияющих факторов процесса нанесения покрытия были выбраны параметры, способные в наибольшей степени оказать влияние на конечный результат, а именно, параметры качества подготовки поверхности, температура

предварительного нагрева поверхности, количество подаваемого реагента при фиксированном расходе плазмообразующего аргона, расстояние от плазмотрона до упрочняемой поверхности и время нанесения покрытия. В качестве критериев процесса использовались коэффициенты адгезии  $S_a$  и когезии  $S_k$ , твердость и микротвердость  $HK$  покрытия.

В качестве тестируемых образцов были выбраны диски диаметром 50мм и толщиной 10мм из стали 45, позволяющие провести оценку качества нанесения покрытия.

Для сравнительной оценки величины адгезии применялся склерометрический способ определения силы сцепления, а для измерения микротвердости применялся микротвердомер ПМТ–3М с пирамидой Кнупа, позволяющая производить измерение особо тонких покрытий или хрупких материалов.

Качество подготовки поверхности определялось сравнением четырех видов материалов для очистки поверхности: бензин «Калоша», очиститель, спирт, бензин «Калоша» со спиртом. Поверхность пятого образца не обезжиривалась. После обезжиривания подложек образцы были нагреты в печи до 80<sup>0</sup>С. Подача транспортирующего газа составляла 0,4 л/мин, подача плазмообразующего газа – 3 л/мин. Расстояние от сопла плазмотрона до поверхности образцов составляло 12 мм. После испытания поверхности образцов на адгезию был выбран наиболее оптимальный вариант подготовки подложек: обезжиривание очистителем универсальным ТУ 2384–010–50161205–2003 (рисунок 1), который обеспечивает значения коэффициентов адгезии  $S_a = 0,15$  и когезии  $S_k = 0,08$ . Немного уступают данному очистителю по качеству подготовки поверхности спирт и смесь спирта с бензином «Калоша». Наиболее низкими значениями коэффициентов, как и предполагалось, характеризуется отсутствие какой-либо обработки, при которой  $S_a = 0,51$ ,  $S_k = 0,36$ .

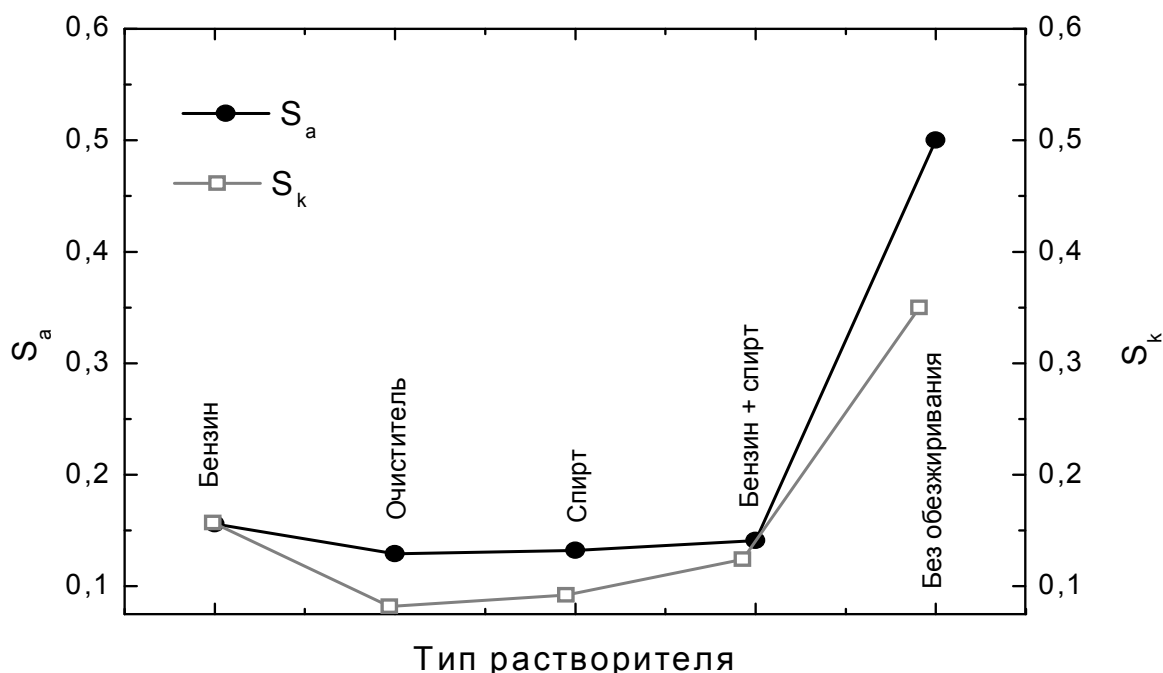


Рисунок 1 – Зависимость коэффициентов  $S_a$  и  $S_k$  покрытий от типа растворителя

Для установления оптимальной температуры предварительного нагрева были подогреты в печи шесть образцов до разных температур: 80<sup>0</sup>С, 110<sup>0</sup>С, 130<sup>0</sup>С, 170<sup>0</sup>С, 200<sup>0</sup>С и 230<sup>0</sup>С. Поверхность шестого образца после нагрева до 230<sup>0</sup>С приобрела желтоватый оттенок, что свидетельствует об окислении поверхности. На каждом из образцов было сделано по 4 точечных напыления упрочняющего покрытия. Время первых трех напылений на поверхности каждого образца составляло: 15 с, 30 с и 60 с. Время четвертого точечного

напыления варьировалось на каждом образце от 180 с до 300 с. Наилучшие результаты были получены для времени напыления 60 с. Результаты испытаний образцов на адгезионные свойства и микротвердость для времени нанесения покрытия 60 с представлены на рисунке 2 и рисунке 3. Из этих рисунков следует, что по прочностным критериям адгезии и когезии наиболее оптимальной температурой нагрева является температура 115<sup>0</sup>С ( $S_a = 0,02$ ,  $S_k = 0,025$ ), а по твердости – температура 130<sup>0</sup>С ( $HK = 560$ ).

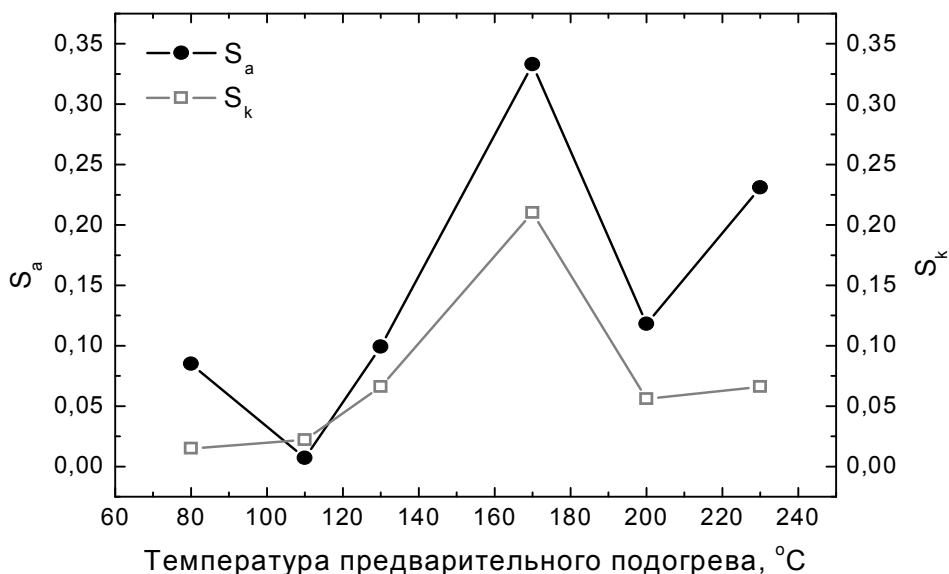


Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов  $S_a$  и  $S_k$  покрытий от температуры предварительного подогрева подложки в печи (время напыления 60 с)

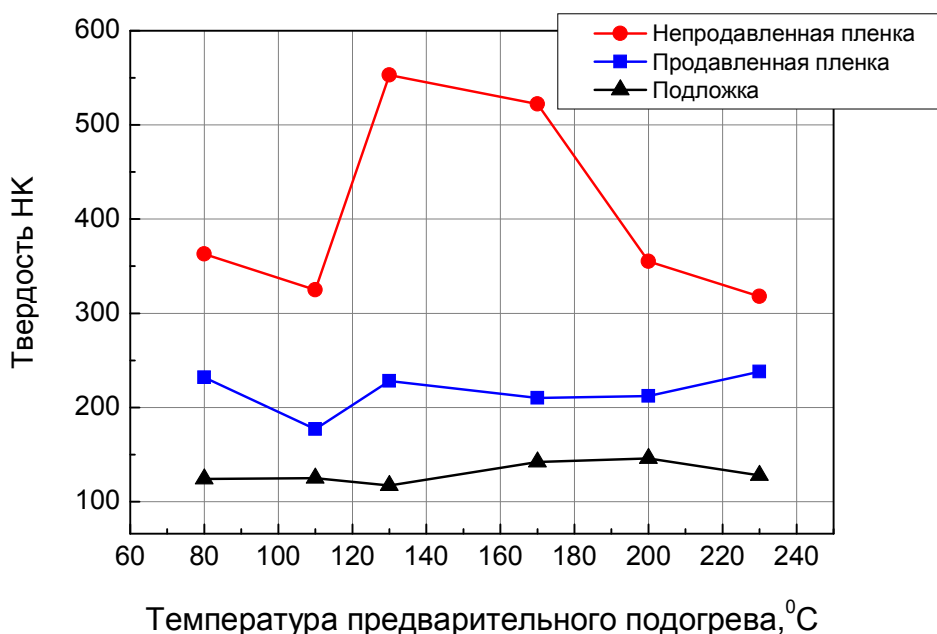


Рисунок 3 – График зависимости изменения твердости НК от температуры предварительного подогрева подложки в печи (время напыления 60 с)

Для выбора наиболее оптимального типа предварительного нагрева образцов помимо изученного варианта нагрева в печи также были проведены опыты для вариантов: без подогрева в печи и без обработки плазмой, без подогрева в печи с обработкой плазмой, комбинированный вариант с подогревом в печи и с нагревом плазмой.

Комбинированный нагрев испытуемых образцов заключался в том, что поверхность образца, предварительно нагретого в печи до 130 °С в течение 60 секунд, обрабатывалась



плазмой, с подачей плазмобразующего газа 2,75 л/мин при вращении образца в трехкулачковом токарном патроне. Время обработки поверхности образца плазмой составляло 5 мин. По результатам исследования адгезионных свойств наиболее предпочтительным оказался вариант предварительного подогрева в печи без плазменной обработки. Разница микротвердости поверхностей образцов при стандартном подогреве в печи и комбинированном подогреве составляла величину, соразмерную погрешности измерений. Следовательно, оптимальным является подогрев в печи в течение 60 секунд при температуре 115–130<sup>0</sup>С без дополнительного плазменного нагрева.

Варьирование количества подаваемого реагента осуществлялось изменением расхода транспортирующего газа. Расход транспортирующего газа варьировался в интервале от 0,3 до 0,6 л/мин. Подача плазмобразующего газа не изменялась и составляла 2,75 л/мин. Расстояние от сопла плазмотрона до поверхности образца равнялось 7 мм. Напыление имело точечный характер, каждая точка напылялась 20 с. Максимальное значение микротвердости 2091 ед. тв. было получено при расходе транспортирующего газа 0,4 ± 0,05 л/мин.

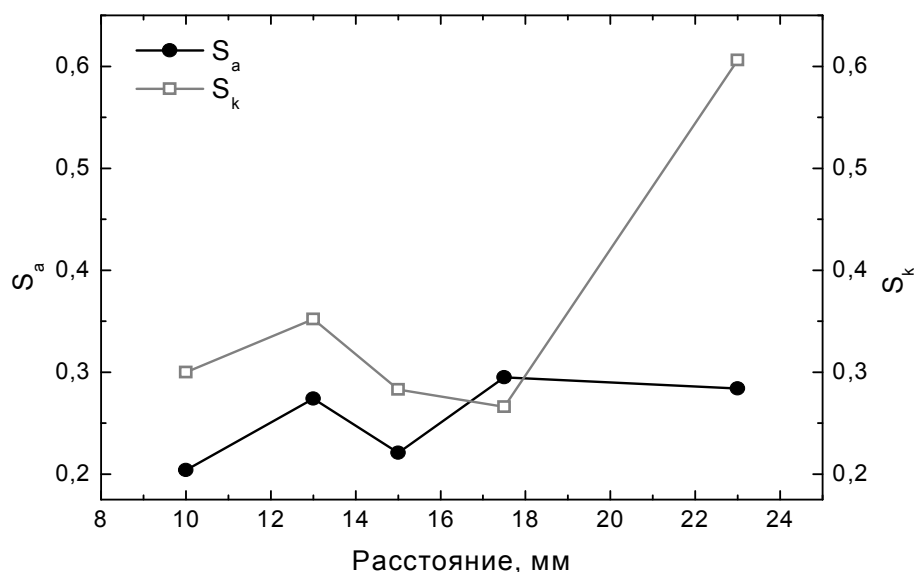


Рисунок 4 – Зависимость коэффициентов  $S_a$  и  $S_k$  покрытий от расстояния между соплом плазмотрона и поверхностью подложки

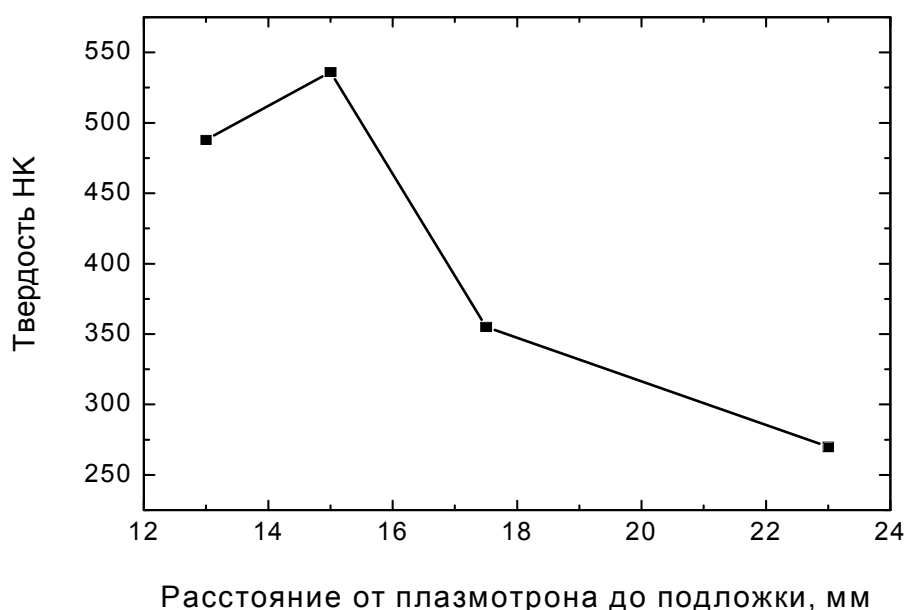


Рисунок 5 – Зависимость твердости НК от расстояния плазмотрон–подложка

Влияние дистанции напыления в интервале от 5 мм до 23 мм на критерии качества покрытия представлены на рисунке 4 и рисунке 5. Испытания проводились при расходе транспортирующего и плазмообразующего газа 0,7 л/мин и 2,75 л/мин соответственно. Напыление производилось точно, каждая точка напылялась 60 с. Наилучшие адгезионные свойства имеют образцы, полученные при расстояниях 10–17,5 мм ( $S_a = 0,2–0,26$ ,  $S_k = 0,28–0,35$ ) (рисунок 4). Максимальное значение твердости составило  $HK = 560$ , микротвердости – 2147 ед. тв. при расстоянии от сопла плазмотрона до поверхности образца равном 15 мм (рисунок 5).

Таким образом, исследованное влияние факторов финишного плазменного упрочнения образцов из стали 45 на прочностные характеристики и твердость оксикаридных пленочных покрытий показало, что оптимальными диапазонами значений факторов являются интервалы: по предварительному подогреву образцов в печи при температуре – 115–130<sup>0</sup>С, по дистанции напыления – 10–17,5 мм, по расходу транспортирующего газа –  $0,4 \pm 0,05$  л/мин. При этом получают покрытия с прочностными характеристиками твердостью в диапазонах:  $S_a = 0,02–0,26$ ,  $S_k = 0,025–0,35$ ,  $HK = 350–560$ .

Для получения более узких оптимальных диапазонов факторов финишной плазменной обработки и с учетом других факторов, таких как мощность плазмотрона, скорость перемещения плазмотрона относительно подложки, расход плазмообразующего газа и дополнительных присадок к нему необходимо проведение многофакторного эксперимента. Это сделает возможным прогнозирование свойств покрытия при каждом конкретном случае его нанесения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поландова, Л.И. Высокие технологии в инновационной экономике / Е.Ю. Степанова, Л.И. Поландова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2007. – № 3. – С. 156–167.
2. Степанова, Е.Ю. Научные отрасли и высокие технологии – основа технологической безопасности и независимости страны / Е.Ю. Степанова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 2 (304). – С. 122–132.
3. Степанова, Е.Ю. Экспортные ограничения США и ЕС как стимул к развитию наукоемких и высокотехнологичных секторов экономики / Е.Ю. Степанова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 3 (305) – С 96–103.
4. Фокин, М. Станки под контролем заграницы. – URL: <http://rusplt.ru/society/stanki-pod-kontrolem-zagranitsyi-15840.html>. – Дата обращения: 20.05.2015.
5. Соснин, Н.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского политехнического университета, 2008. – 406 с.
6. Тополянский, П.А. Опыт нанесения электроискровых покрытий на режущий инструмент и штамповую оснастку / П.А. Тополянский // Металлообработка. – 2004. – № 6(24). – С. 37–40.
7. Кадырметов, А.М. Особенности процесса воздушно-плазменного нанесения и упрочнения покрытий / А.М. Кадырметов, Г.А. Сухочев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 4 (52). – С. 25–28.
8. Кадырметов, А.М. Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством / А.М. Кадырметов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 81. – С. 308–325.

### **Смоленцев Евгений Владиславович**

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
Доктор технических наук, доцент кафедры  
«Технология машиностроения»  
E-mail: [smolentsev.rabota@gmail.ru](mailto:smolentsev.rabota@gmail.ru)

### **Кондратьев Михаил Вячеславович**

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
Старший преподаватель кафедры  
«Автоматизированное оборудование  
машиностроительного производства»  
E-mail: [540520@mail.ru](mailto:540520@mail.ru)

### **Кадырметов Анвар Минирович**

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф.Морозова, г. Воронеж  
Доктор технических наук, профессор, доцент кафедры  
«Производство, ремонт и эксплуатация машин»  
E-mail: [kadyrmetov.a@mail.ru](mailto:kadyrmetov.a@mail.ru)

### **Бобров Евгений Сергеевич**

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
E-mail: [evgeny71job@gmail.ru](mailto:evgeny71job@gmail.ru)

Ye.V. SMOLENTSEV, A.M. KADYRMETOV, M.V. KONDRATYEV, Ye.S. BOBROV

## OPTIMIZATION OF PROCESS OF APPLICATION PLASMA HARDENING COATING

*Considered the problem increasing tool life by applying an wear-resistant coatings. However, the lack of technology-based methods and optimal regimes complicate this process. A method for finishing plasma hardening of metals which allows evaluate the quality of the wear-resistant thin-film coatings and optimize application regimes.*

**Keywords:** wear-resistant coating; thin-film coating; cleaning of workpiece; adhesion; cohesiveness; microhardness; application regime.

### BIBLIOGRAPHY

1. Polandova, L.I. Vysokiye tekhnologii v innovatsionnoy ekonomike / Ye.YU. Stepanova, L.I. Polandova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2007. – № 3. – S. 156–167.
2. Stepanova, Ye.YU. Naukoyemkiye otrasli i vysokiye tekhnologii – osnova tekhnologicheskoy bezopasnosti i nezavisimosti strany / Ye.YU. Stepanova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 2 (304). – S. 122–132.
3. Stepanova, Ye.YU. Eksportnyye ogranicheniya SSHA i YES kak stimul k razvitiyu naukoyemkikh i vysokotekhnologichnykh sektorov ekonomiki / Ye.YU. Stepanova // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 3 (305) – S 96–103.
4. Fokin, M. Stanki pod kontrolem zagranitsy. – URL: <http://rusplt.ru/society/stanki-pod-kontrolem-zagranitsyi-15840.html>. – Data obrashcheniya: 20.05.2015.
5. Sosnin, N.A. Plazmennyye tekhnologii. Rukovodstvo dlya inzhenerov / N.A. Sosnin, S.A. Yermakov, P.A. Topolyanskiy. – SPb.: Izd-vo Sankt–Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta, 2008. – 406 s.
6. Topolyanskiy, P.A. Opyt naneseniya elektroiskrovnykh pokrytiy na rezhushchiy instrument i shtampovuyu osnastku / P.A. Topolyanskiy // Metalloobrabotka. – 2004. – № 6(24). – S. 37–40.
7. Kadyrmetov, A.M. Osobennosti protsessa vozdušno-plazmennogo naneseniya i uprochneniya pokrytiy / A.M. Kadyrmetov, G.A. Sukhochev // Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya. – 2009. – № 4 (52). – S. 25–28.
8. Kadyrmetov, A.M. Issledovaniye protsessov plazmennogo naneseniya i uprochneniya pokrytiy i puti upravleniya ikh kachestvom / A.M. Kadyrmetov // Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2012. – № 81. – S. 308–325.

#### **Smolentsev Evgeny Vladislavovich**

Voronezh State Technical University, Voronezh  
Doctor of Technical Sciences, assistant professor of chair  
«Technology of Mechanical Engineering»  
E-mail: smolentsev.rabota@gmail.ru

#### **Kadyrmetov Anvar Minirovich**

Voronezh State Forestry University of G. F. Morozov, Voronezh  
Doctor of Technical Sciences, professor, assistant  
professor of chair «Production, repair and operation of  
machinery»  
E-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

#### **Kondratiev Mikhail Vyacheslavovich**

Voronezh State Technical University, Voronezh  
Senior teacher of chair «The automated equipment of  
machine-building production»  
E-mail: 540520@mail.ru

#### **Bobrov Evgeny Sergeevich**

Voronezh State Technical University, Voronezh  
Graduate student of chair «Technology of Mechanical  
Engineering»  
E-mail: evgeny71job@gmail.ru

С.Г. ЕМЕЛЬЯНОВ, Ю.А. МАЛЬНЕВА, О.Г. КУЦ

## НАЗНАЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ПОГРЕШНОСТЬ ОБРАБОТКИ

*В статье описано назначение требований к точности металлорежущего инструмента на основе установления взаимного влияния основных элементов металлорежущей системы на погрешность обработки.*

**Ключевые слова:** металлорежущий инструмент, точность, металлорежущая система.

Режущий инструмент является конечным звеном формообразующей системы и от правильного назначения требований к точности изготовления режущего инструмента во многом зависит точность всей металлорежущей системы. Поэтому задача назначения требований к точности металлорежущего инструмента должно решаться на основе установления взаимного влияния основных элементов металлорежущей системы (станка, приспособлений и инструмента) на выходную точность. Данная задача может быть решена следующим образом.

1. Строим основное уравнение формообразования рассматриваемой металлорежущей системы [1–5]:

$$\bar{r}_0 = A_{0,l} \bar{r}_l, \quad (1)$$

где  $\bar{r}_0$  – радиус–вектор точек обрабатываемой поверхности;

$A_{0,l} = \prod_{i=1}^l A_{i-1,i}^{j_i}$  – матрица учитывающая преобразования всей формообразующей системы (ФС);

$\bar{r}_l$  – радиус–вектор точек режущего инструмента.

2. Выражение (1) представим как [2–5]:

$$\bar{r}_0 = A_{\text{пр1}} A_{\text{ст}} A_{\text{пр2}} A_{\text{и}} \bar{e}^4, \quad (2)$$

где  $A_{\text{пр1}}, A_{\text{пр2}}$  – матрицы преобразований координат приспособлений;

$A_{\text{ст}}$  – матрица преобразований станка;

$A_{\text{и}}$  – матрица преобразований координат инструмента.

$\bar{e}^4$  – радиус–вектор начала координат  $\bar{e}^4 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ .

Матрицы  $A_{\text{пр1}}, A_{\text{пр2}}, A_{\text{ст}}$  и  $A_{\text{и}}$  могут быть представлены в виде произведения матриц  $A^j$ .

3. Строим уравнение векторного баланса точности металлорежущей системы [1–5]:

$$\Delta \bar{r}_0 = \sum_{i=0}^l A_{0,i} \varepsilon_i A_{i,l} \bar{r}_l, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_i$  – матрица вариации  $i$ -го узла ФС, которая фактически задает погрешность положения  $i$ -го узла относительно  $(i+1)$ -го узла.

В работе [1] показано, что в общем виде матрицу  $\varepsilon_i$  можно представить в виде суммы:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{пов}i} + \varepsilon_{\text{пер}i}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{\text{пов}i}$  – матрица чистого поворота системы координат  $i$ -го звена ФС;

$\varepsilon_{\text{пер}i}$  – матрица чистого поворота системы координат  $i$ -го звена ФС:

$$\varepsilon_{повi} = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_i & \beta_i & 0 \\ \gamma_i & 0 & -\alpha_i & 0 \\ -\beta_i & \alpha_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \varepsilon_{перi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \delta_{xi} \\ 0 & 0 & 0 & \delta_{yi} \\ 0 & 0 & 0 & \delta_{zi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $\delta_{xi}, \delta_{yi}, \delta_{zi}$  – малые абсолютные смещения системы координат  $i$ -го звена ФС станка соответственно вдоль осей  $X, Y, Z$ ;

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  – малые углы поворота системы координат  $i$ -го звена ФС станка соответственно вокруг осей  $X, Y, Z$ .

С учетом (2) выражение (3) можно представить как:

$$\Delta \bar{r}_0 = (\varepsilon_0 A_{пр1} A_{ст} A_{пр2} A_{и} + A_{пр1} \varepsilon_1 A_{ст} A_{пр2} A_{и} + \\ + A_{пр1} A_{ст} \varepsilon_2 A_{пр2} A_{и} + A_{пр1} A_{ст} A_{пр2} \varepsilon_3 A_{и}) \bar{e}^4, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – матрицы вариации систем координат первого приспособления, станка, второго приспособления и инструмента.

Представим выражение (6) в виде:

$$\Delta \bar{r}_0 = \Delta \bar{r}_{0ппр} + \Delta \bar{r}_{0сс} + \Delta \bar{r}_{0ппр} + A_{\Delta} \varepsilon_3 A_{и} \bar{e}^4, \quad (7)$$

где  $\Delta \bar{r}_{0ппр} = \varepsilon_0 A_{пр1} A_{ст} A_{пр2} A_{и} \bar{e}^4$ ;  $\Delta \bar{r}_{0сс} = A_{пр1} \varepsilon_1 A_{ст} A_{пр2} A_{и} \bar{e}^4$ ;

$$\Delta \bar{r}_{0ппр} = A_{пр1} A_{ст} \varepsilon_2 A_{пр2} A_{и} \bar{e}^4; A_{\Delta} = A_{пр1} A_{ст} A_{пр2}.$$

4. Для получения скалярной оценки точности, находим величину проекции вектора  $\Delta \bar{r}_0$  в направлении вектора  $\bar{a} = [a_x \ a_y \ a_z \ 0]^T$

$$\Delta r_a = \Delta \bar{r}_0 \cdot \bar{a} = \Delta r_{0x} a_x + \Delta r_{0y} a_y + \Delta r_{0z} a_z. \quad (8)$$

5. Подставляя (7) в (8) получим:

$$\Delta r_a = \Delta \bar{r}_0 \cdot \bar{a} = (\Delta \bar{r}_{0ппр} + \Delta \bar{r}_{0сс} + \Delta \bar{r}_{0ппр} + A_{\Delta} \varepsilon_3 A_{и} \bar{e}^4) \cdot \bar{a}, \quad (9)$$

и выполняя преобразование (2.3.9) получим:

$$\Delta r_a - (\Delta \bar{r}_{0ппр} + \Delta \bar{r}_{0сс} + \Delta \bar{r}_{0ппр}) \cdot \bar{a} = A_{\Delta} \varepsilon_3 A_{и} \bar{e}^4 \cdot \bar{a}, \quad (10)$$

6. Выражение  $A_{\Delta} \varepsilon_3 A_{и} \bar{e}^4 \cdot \bar{a}$  представляет собой составляющую погрешности обработки приходящуюся на режущий инструмент в направлении вектора  $\bar{a}$ .

Если исходить из того, что скалярная величина  $\Delta r_a$ , связанная с допуском на размер, и элементы матриц  $\varepsilon_0, \varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  входящие в  $(\Delta \bar{r}_{0ппр} + \Delta \bar{r}_{0сс} + \Delta \bar{r}_{0ппр})$  являются известными величинами [6–8] т.е. известны интервалы значений для этих величин  $\pm \delta_{xi}, \pm \delta_{yi}, \pm \delta_{zi}, \pm \alpha_i, \pm \beta_i$  и  $\pm \gamma_i$ , где  $i = 0, 2$ , то условие обеспечения точности МС можно выразить как:

$$\Delta r_a - \sup |(\Delta \bar{r}_{0ппр} + \Delta \bar{r}_{0сс} + \Delta \bar{r}_{0ппр}) \cdot \bar{a}| \geq \sup |A_{\Delta} \varepsilon_3 A_{и} \bar{e}^4 \cdot \bar{a}|, \quad (11)$$

С использованием условия (11) становится возможным назначение элементов матрицы  $\varepsilon_3$  в виде интервалов значений  $\pm \delta_{x3}, \pm \delta_{y3}, \pm \delta_{z3}, \pm \alpha_3, \pm \beta_3$  и  $\pm \gamma_3$  при которых будет обеспечена точность всей МС.

Пример. Рассмотрим процесс фрезерования тонкостенных деталей с малыми углами конусности (рисунок 1) на горизонтально-фрезерном станке нормальной точности (Н). При этом должна обеспечиваться точность размеров  $H_1, h_1, h_2$ .

Данному способу фрезерования будет соответствовать следующее основное уравнение формообразования [1]:

$$\bar{r}_0 = A^1(x) A^6(-\varphi) \bar{R}_F, \quad (12)$$

где  $A^1(x)$  – матрица описывающая продольное перемещение стола с закреплённой на нем заготовкой;

$A^6(-\varphi)$  – матрица описывающая вращение шпинделя станка с установленной фрезой;

$\bar{R}_F$  – уравнение профиля производящей поверхности фрезы  $\bar{R}_F = (R_f, 0, z, 1)^T$ .

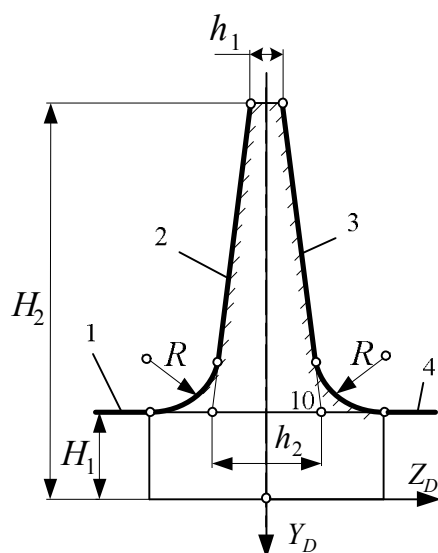


Рисунок 1 – Профиль обрабатываемой детали

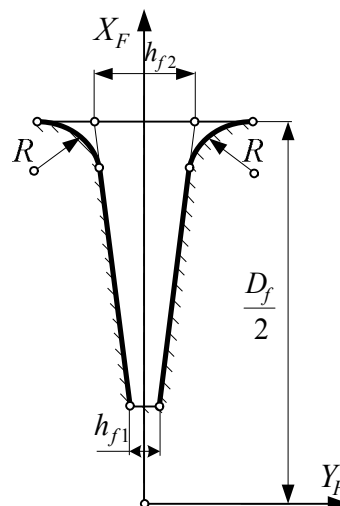


Рисунок 2 – Профиль производящей поверхности

Построим выражение векторного баланса точности:

$$\Delta \bar{r}_0 = (\varepsilon_0 A^1(x) A^6(-\varphi) + A^1(x) \varepsilon_1 A^6(-\varphi) + A^1(x) A^6(-\varphi) \varepsilon_2) \cdot \bar{R}_F, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  – матрицы вариации систем координат соответствующих звеньев формообразующей системы, соответственно стола с закрепленной заготовкой, шпиндельного узла и фрезы.

Для поверхности 1-й и 4-й при  $\bar{a} = [0 \quad -1 \quad 0 \quad 0]^T$  получаем (9) в виде:

$$\begin{aligned} \Delta r_a = & z\alpha_0 - \gamma_0 [R_f \cos(\varphi) + x] - \delta_{y0} + z\alpha_1 - \gamma_1 R_f \cos(\varphi) - \delta_{y1} + \\ & + z\beta_2 \sin(\varphi) + z\alpha_2 \cos(\varphi) - R_f \gamma_2 \cos(\varphi) + \delta_{x2} \sin(\varphi) - \delta_{y2} \cos(\varphi). \end{aligned} \quad (14)$$

С учётом связи огибания  $\varphi = \pi/2$  для (14) получим:

$$\Delta r_a = z\alpha_0 - x\gamma_0 - \delta_{y0} + z\alpha_1 - \delta_{y1} + z\beta_2 + \delta_{x2}, \quad (15)$$

И далее (11):

$$\Delta r_a - \sup | -z(\alpha_0 + \alpha_1) + x\gamma_0 + (\delta_{y0} + \delta_{y1}) | \geq \sup | z\beta_2 + \delta_{x2} |. \quad (16)$$

Исходя из того, что в процессе эксплуатации МС в ней протекают процессы различных скоростей [5–6], то погрешность обработки можно рассматривать как результат действия соответствующих составляющих:

$$\Delta r_a = \Delta r_{ст} + \Delta r_{дин} + \Delta r_{тем} + \Delta r_{из.ин} + \Delta r_{из.ст}, \quad (17)$$

где  $\Delta r_{ст}$  – статическая составляющая погрешности обработки;

$\Delta r_{дин}$  – динамическая составляющая погрешности обработки (быстропротекающий процесс);

$\Delta r_{тем}$  и  $\Delta r_{из.ин}$  – погрешности, вызванные соответственно температурными деформациями и износом инструмента (процесс средней скорости);

$\Delta r_{из.ст}$  – погрешность вызванные износом деталей узлов МС (медленные процессы).

Статическая составляющая погрешности обработки связана с погрешностью наладки и изготовления элементов МС (в т.ч. с погрешностью аппроксимации профиля фрезы)  $\Delta r_n$ , погрешностью базирования заготовок  $\Delta r_{\bar{b}}$  и погрешностью обработки, возникающей в результате смещения элементов технологической системы под действием силы резания  $\Delta r_{ж}$  [9]:

$$\Delta r_{ст} = \Delta r_n + \Delta r_{\bar{b}} + \Delta r_{ж}. \quad (18)$$

В данном примере будем рассматривать лишь составляющую  $\Delta r_n$  входящую в (18), на долю которой будет приходиться не менее 50% от  $\Delta r_a$ .

Сумму  $(\delta_{y0} + \delta_{y1})$  в (16) связанную с погрешностью вертикального положения стола и шпинделя исключим из рассмотрения, т.к. она может быть компенсирована настройкой на размер посредством перемещения стола по оси  $Y$  на обратную величину.

Составляющая  $z(\alpha_0 + \alpha_1)$  в (16) связана с отклонением от параллельности оси вращения горизонтального фрезерного шпинделя относительно рабочей поверхности стола. Допуск на данное отклонение для горизонтально-фрезерных станков класса точности Н равен 8 мкм [10], тогда примем  $z(\alpha_0 + \alpha_1) = \pm 4$  мкм.

Составляющая  $x\gamma_0$  в (16) связана отклонением от прямолинейности и параллельности траектории продольного перемещения стола относительно его рабочей поверхности. Допуск на данное отклонение для горизонтально-фрезерных станков класса точности Н равен 20 мкм [10], тогда прием  $x\gamma_0 = \pm 10$  мкм.

Для размера  $H_1 = 30_{-0,2}$  мм (рисунок 2) величина  $\Delta \bar{r}_a = 200$  мкм и следовательно  $\Delta r_n = 100$  мкм, тогда согласно (16) получим:

$$100 - | -(-8) + 10 | \geq \sup | z\beta_2 + \delta_{x2} |.$$

Таким образом, для обработки 1-й и 4-й поверхностей детали необходимо, чтобы набор фрез удовлетворял условию:

$$\sup | z\beta_2 + \delta_{x2} | \leq 82 \text{ мкм.} \quad (17)$$

Выражение (17) при равном распределении долей между величинами  $z\beta_2$  и  $\delta_{x2}$  может быть представлено в виде эквивалентной системы условий:

$$\begin{cases} z\beta_2 \leq 41 \text{ мкм;} \\ \delta_{x2} \leq 41 \text{ мкм.} \end{cases} \quad (18)$$

Составляющая  $\delta_{x2}$  связана с величиной допуска на диаметр фрезы, а также с величиной радиального биения ( $ECR$ ). Составляющая связанная с допуском на диаметр фрезы может быть компенсирована настройкой на размер посредством перемещения стола по оси  $Y$  на обратную величину [7–9].

Составляющая  $z\beta_2$  связанной с величиной конусообразности профиля фрезы ( $EFP$ ). Следовательно, точность обработки должна быть обеспечена составляющими  $\delta_{x2}$ , связанной с величиной радиального биения ( $ECR$ ) и  $z\beta_2$ , связанной с величиной конусообразности профиля фрезы ( $EFP$ ):

$$\begin{cases} EFP \leq 41 \text{ мкм,} \\ ECR \leq 41 \text{ мкм.} \end{cases} \quad (19)$$

При уровне относительной геометрической точности А [11] систему (19) можно дополнить:

$$\begin{cases} EFP \leq 41 \text{ мкм,} \\ ECR \leq 41 \text{ мкм,} \\ TD_f \leq 204 \text{ мкм,} \end{cases} \quad (20)$$

где  $TD_f$  – допуск на диаметр фрезы.

Для 2-й и 3-й поверхностей запишем основные уравнения формообразования:

$$\bar{r}_{02} = A^1(x)A^6(-\varphi)\bar{R}_{F2}, \quad (21)$$

и

$$\bar{r}_{03} = A^1(x)A^6(-\varphi)\bar{R}_{F3}, \quad (22)$$

где  $\bar{R}_{F2} = [x_2 \ 0 \ z_2 \ 1]^T$  и  $\bar{R}_{F3} = [x_3 \ 0 \ z_3 \ 1]^T$ .

Производя вычисления для (9) и находя проекцию вектора  $\Delta \bar{r}_{02}$  (для 2-й поверхности) в направлении вектора нормали к обрабатываемой поверхности  $\bar{a} = [0 \ 0 \ -1 \ 0]^T$  получаем (8) с учётом связи огибания  $\varphi = \pi/2$

$$\Delta r_{a2} = x_2 \alpha_0 + x_2 \beta_0 - \delta_{z0} + x_2 \alpha_1 - \delta_{z1} + x_2 \beta_{22} - \delta_{z22}, \quad (23)$$

а для 3-й поверхности получаем:

$$\Delta r_{a3} = -x_3 \alpha_0 - x_3 \beta_0 + \delta_{z0} - x_3 \alpha_1 + \delta_{z1} - x_3 \beta_{23} + \delta_{z23}. \quad (24)$$

Тогда, с учётом того, что 2-я и 3-я поверхности симметричны примем  $x_2 = x_3 = x$  и получим скалярное выражение для погрешности толщины стенки:

$$\Delta H(x) = \Delta r_{a1} + \Delta r_{a2} = x(\beta_{23} - \beta_{22}) + (\delta_{z23} - \delta_{z22}) \quad (25)$$

и далее

$$\Delta H(x) \geq \sup |x(\beta_{23} - \beta_{22}) + (\delta_{z23} - \delta_{z22})|. \quad (26)$$

Для размера  $h_1 = 3_{-0,2}$  мм величина  $\Delta H(D_f/2 - H_2 + H_1) = 200$  мкм и следовательно  $\Delta H_H(D_f/2 - H_2 + H_1) = 100$  мкм, тогда:

$$100 \geq \sup |(D_f/2 - H_2 + H_1)(\beta_{23} - \beta_{22}) + (\delta_{z23} - \delta_{z22})|. \quad (27)$$

Для размера  $h_2 = 4_{-0,4}$  мм величина  $\Delta H(D_f/2) = 400$  мкм и следовательно  $\Delta H_H(D_f/2) = 200$  мкм, тогда:

$$200 \geq \sup |(D_f/2)(\beta_{23} - \beta_{22}) + (\delta_{z23} - \delta_{z22})|. \quad (28)$$

Выражения (27) и (28) можно также представить в виде систем:

$$\begin{cases} |(D_f/2 - H_2 + H_1)(\beta_{23} - \beta_{22})| \leq 20 \text{ мкм;} \\ |\delta_{z23} - \delta_{z22}| \leq 80 \text{ мкм} \end{cases} \quad (29)$$

на диаметре  $(D_f/2 - H_2 + H_1)$  и

$$\begin{cases} |(D_f/2)(\beta_{23} - \beta_{22})| \leq 40 \text{ мкм;} \\ |\delta_{z23} - \delta_{z22}| \leq 160 \text{ мкм} \end{cases} \quad (30)$$

на диаметре  $D_f/2$  мм.

Составляющая  $(\delta_{z23} - \delta_{z22})$  связана с величиной допуска на размеры  $h_{f1}$  и  $h_{f2}$  набора фрез и величиной торцевого биения (ЕСА) профиля производящей поверхности левой и правой фрезы, а составляющая  $x(\beta_{23} - \beta_{22})$  с величиной отклонения от соосности производящей поверхности фрез (ЕРС), поэтому системы (29) и (30) могут быть представлены как:

$$\begin{cases} EPC_3 \leq \frac{H}{2} \beta_{23} = (H/2) \cdot 10 / (D_f/2 - H_2 + H_1) \text{ мкм;} \\ EPC_2 \leq \frac{H}{2} \beta_{22} = (H/2) \cdot 10 / (D_f/2 - H_2 + H_1) \text{ мкм;} \\ Th_{f1} \leq 60 \text{ мкм;} \\ ECA_3 \leq 10 \text{ мкм;} \\ ECA_2 \leq 10 \text{ мкм,} \end{cases} \quad (31)$$

на диаметре  $(D_f/2 - H_2 + H_1)$  и

$$\begin{cases} EPC_3 \leq \frac{H}{2} \beta_{23} = (H/2) \cdot 20 / (D_f/2) \text{ мкм;} \\ EPC_2 \leq \frac{H}{2} \beta_{22} = (H/2) \cdot 20 / (D_f/2) \text{ мкм;} \\ Th_{f2} \leq 120 \text{ мкм;} \\ ECA_3 \leq 20 \text{ мкм;} \\ ECA_2 \leq 20 \text{ мкм} \end{cases} \quad (32)$$



на диаметре  $(D_f/2)$ , где  $EPC_2$  и  $EPC_3$  – отклонение от соосности фрез набора соответственно предназначенных для обработки 2-й и 3-й поверхности детали;  $H$  – ширина набора фрез;  $ECA_2$  и  $ECA_3$  – величина торцевого биения для фрез набора соответственно предназначенных для обработки 2-й и 3-й поверхности детали,

При  $D_f = 200$  мм,  $H_2 = 80$  мм и  $H = 40$  мм получим системы условий, являющихся частным решением поставленной задачи:

$$\begin{cases} EPC_3 \leq 4 \text{ мкм}; \\ EPC_2 \leq 4 \text{ мкм}; \\ Th_{f1} \leq 60 \text{ мкм}; \\ ECA_3 \leq 10 \text{ мкм}; \\ ECA_2 \leq 10 \text{ мкм} \end{cases} \quad (33)$$

на диаметре  $(D_f/2 - H_2 + H_1)$  и

$$\begin{cases} EPC_3 \leq 4 \text{ мкм}; \\ EPC_2 \leq 4 \text{ мкм}; \\ Th_{f2} \leq 120 \text{ мкм}; \\ ECA_3 \leq 20 \text{ мкм}; \\ ECA_2 \leq 20 \text{ мкм} \end{cases} \quad (34)$$

на диаметре  $(D_f/2)$ .

В виду того, что неравенства (16), (27) и (28) не имеют однозначного решения, они фактически определяют область возможных проектных решений поставленной задачи, то полученная систем условий (20) и (33) и (34) является их частным решением, позволяющим обеспечить заданную точность обработки детали.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №16–38–00166.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетов, Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
2. Ивахненко, А.Г. Концептуальное проектирование металлорежущих систем. Структурный синтез / А.Г. Ивахненко; Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 1998. – 124 с.
3. Ивахненко, А.Г. Структурно-параметрический синтез технологических систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2010. – 153 с.
4. Ивахненко, А.Г. Предпроектные исследования металлорежущих систем / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц // Юго-Западный государственный университет. Курск, 2013. – 188 с.
5. Ивахненко, А.Г. Методология структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем: монография / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, О.Ю. Еренков, А.В. Олейник, М.Ю. Сариллов // КнаАГТУ, 2015. – 282 с.
6. Ивахненко, А.Г. Выявление геометрических погрешностей металлорежущих станочных систем, влияющих на точность обработки / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, С.Б. Долженкова // Известия Курского государственного технического университета. – 2010. – № 2 (31). – С. 60–65.
7. Аникеева, О.В. Прогнозирование параметрической надежности прецизионного технологического оборудования / О.В. Аникеева, А.Г. Ивахненко, В.В. Куц // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2 (298). – С. 159–164.
8. Куц, В.В. Обеспечение точности специализированной металлорежущей системы для обработки РК-профильных валов на раннем этапе проектирования / В.В. Куц, Ю.А. Максименко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2012. – № 2. – Ч. 1. – С. 65–69.
9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1 / Подред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 656 с.
10. ГОСТ 17734–88. Станки фрезерные консольные. Нормы точности и жесткости. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 6 с.
11. ГОСТ 25346–89. Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 6 с.

12. Куц, В.В. Проектирование дисковых фрез с конструктивной радиальной подачей для обработки профильных валов: монография / В.В. Куц; Ю.А. Мальнева, А.А. Горохов Курск: ЮЗГУ, 2015. – 132 с.

**Емельянов Сергей Геннадьевич**  
Юго-Западный государственный  
университет, г. Курск  
Доктор технических наук,  
профессор, ректор ЮЗГУ  
Тел.: 50-48-08  
E-mail: rector@swsu.ru

**Мальнева Юлия Андреевна**  
Юго-Западный государственный  
университет, г. Курск  
Кандидат технических наук, старший  
преподаватель кафедры «Автомобили,  
транспортные системы и процессы»  
Тел.: 8-951-333-92-99  
E-mail: yuliyamaximenko2010@yandex.ru

**Куц Ольга Геннадьевна**  
Юго-Западный  
государственный  
университет, г. Курск  
магистр кафедры  
«Машиностроительные  
технологии и оборудование»  
Тел.: (4712) 32-61-00  
E-mail: kuc-olga@yandex.ru

---

S.G. YEMELYANOV, Yu.A. MALNEVA, O.G. KUTS

## **APPOINTMENT REQUIREMENTS FOR ACCURACY OF METAL INSTRUMENTS BASED ON THE ESTABLISHMENT OF MUTUAL INFLUENCE OF MAIN ELEMENTS METALWORKING SYSTEM FOR ERROR TREATMENT**

*The paper describes the purpose of the accuracy requirements of cutting tools on the basis of the determination of the mutual influence of the basic elements of the metal-cutting system on error processing.*

**Keywords:** metal cutting tools, precision metal cutting system.

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Reshetov, D.N. Tochnost metallovezhushchikh stankov / D.N. Reshetov, V.T. Portman. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 336 s.
2. Ivakhnenko, A.G. Kontseptualnoye proyektirovaniye metallovezhushchikh sistem. Strukturnyy sintez / A.G. Ivakhnenko; Khabarovsk: Izd-vo KHGTU, 1998. – 124 s.
3. Ivakhnenko, A.G. Strukturno-parametricheskii sintez tekhnologicheskikh sistem / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, Kursk. gos. tekhn. un-t. Kursk, 2010. – 153 s.
4. Ivakhnenko, A.G. Predproyektnyye issledovaniya metallovezhushchikh sistem / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts // Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet. Kursk, 2013. – 188 s.
5. Ivakhnenko, A.G. Metodologiya strukturno-parametricheskogo sinteza metallovezhushchikh sistem: monografiya / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, O.YU. Yerenkov, A.V. Oleynik, M.YU. Sarilov // KnaAGTU, 2015. – 282 s.
6. Ivakhnenko, A.G. Vyyavleniye geometricheskikh pogreshnostey metallovezhushchikh stanochnykh sistem, vliyayushchikh na tochnost obrabotki / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, S.B. Dolzhenkova // Izvestiya Kurskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2010. – № 2 (31). – S. 60–65.
7. Anikeyeva, O.V. Prognozirovaniye parametricheskoy nadezhnosti pretsizionnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya / O.V. Anikeyeva, A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 2 (298). – S. 159–164.
8. Kuts, V.V. Obespecheniye tochnosti spetsializirovannoy metallovezhushchey sistemy dlya obrabotki RK-profilnykh valov na rannem etape proyektirovaniya / V.V. Kuts, YU.A. Maksimenko // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii. – 2012. – № 2. – CH. 1. – S. 65–69.
9. Spravochnik tekhnologa-mashinostroyetelya. V 2-kh t. T. 1 / Podred. A. G. Kosilovoy i R. K. Meshcheryakova. – 4-ye izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 656 s.
10. GOST 17734-88. Stanki frezernyye konsolnyye. Normy tochnosti i zhestkosti. – Moskva: Izd-vo standartov, 1989. – 6 s.
11. GOST 25346-89. Osnovnyye normy vzaimozamenyayemosti. Yedinaya sistema dopuskov i posadok. Obshchiye polozheniya, ryady dopuskov i osnovnykh otkloneniy. – Moskva: Izd-vo standartov, 1989. – 6 s.
12. Kuts, V.V. Proyektirovaniye diskovykh frez s konstruktivnoy radialnoy podachey dlya obrabotki profilnykh valov: monografiya / V.V. Kuts; YU.A. Malneva, A.A. Gorokhov Kursk: YUZGU, 2015. – 132 s.

**Yemelyanov Sergey Gennadyevich**  
Southwestern State University, Kursk  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Rector SWSU  
Ph.: 50-48-08  
E-mail: rector@swsu.ru

**Malneva Yuliya Andreyevna**  
Southwestern State University, Kursk  
Candidate of Technical Sciences,  
Senior Lecturer of the Department  
«Automobiles, Transport Systems and  
Processes»  
Ph.: 8-951-333-92-99  
E-mail: yuliyamaximenko2010@yandex.ru

**Kuts Olga Gennadyevna**  
Southwestern State University, Kursk  
Master of the department  
«Engineering technologies and  
equipment»  
Ph.: (4712) 32-61-00  
E-mail: kuc-olga@yandex.ru

В.А. ПАНАЙОТИ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ РЕЛЬЕФА РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЬБОРОВОГО КРУГА ПРИ ШЛИФОВАНИИ С ТВЕРДОЙ СМАЗКОЙ

*В статье рассмотрен механизм взаимодействия эльборового круга и поверхности обрабатываемой детали при шлифовании и установлено влияние твердой смазки на механические и режущие свойства инструмента при шлифовании, показано положительное влияние смазывания на различные показатели: твердость связки круга и геометрические показатели рельефа режущей поверхности: относительную опорную длину профиля, высоту сглаживания профиля, средний шаг между зернами эльбора, среднее количество вершин зерен после шлифования, что приводит к уменьшению коэффициента абразивного резания, удельной работы шлифования и улучшению качества обработанной поверхности.*

**Ключевые слова:** твердая смазка, эльборовый круг, быстрорежущая сталь, рельеф поверхности.

В настоящее время появилось достаточно много различных композиций твердой смазки, позволяющих повысить эффективность обработки и улучшить показатели качества обработки [1–6], в том числе гибридной смазки на основе наноматериалов [7, 8]. Однако механизмы воздействия смазки на процесс шлифования исследованы недостаточно. Поэтому целью работы явилось исследование геометрии рельефа режущей поверхности эльборового круга при шлифовании в условиях смазывания круга в процесса обработки.

В исследованиях использовали эльборовые круги чашечной формы ЛЧК 125x45x32x10x5 ЛО8 С1 100% на керамической связке С10. В качестве обрабатываемого материала использовали образцы из закаленной быстрорежущей стали Р9Ф6 (HRC 64–68) с высотой шлифуемой поверхности 7 мм. В качестве твердого смазочного материала выбрали композицию, в состав которой вошли смазочный агент (гексагональный нитрид бора), связка (стеарин) и химический компонент (малеиновый ангидрид).

Геометрию рабочей поверхности эльборовых кругов исследовали методом профилографирования алмазной иглой с радиусом скругления 2 мкм. Запись профиля осуществлялась на профилографе модели 201. Измерение износа эльборового слоя круга проводили на оптическом длинномере модели ИЗВ–2. Составляющие силы резания определяли с помощью двухкомпонентного динамометра ДШ–2.

На рисунке 1, а представлена фотография рабочей поверхности круга после шлифования стали без использования смазочного материала на следующих режимах: скорость круга 19 м/с; продольная подача 1 м/мин; поперечная подача 0,06 мм/дв. ход. На рабочей поверхности инструмента отчетливо видны частицы обрабатываемого металла. Налипание частиц металла на режущую поверхность круга наблюдается после обработки в обычных условиях уже при поперечной подаче 0,03 мм/дв. ход. В результате этого при интенсивных режимах резания на шлифуемой поверхности образца обнаруживаются следы прижогов. Вследствие физико–химического взаимодействия связки с обрабатываемым материалом, может наблюдаться её вырывание вместе с зернами эльбора с режущей поверхности круга. Авторы работы [2] квалифицируют такое вырывание в условиях трения двух поверхностей как недопустимый вид разрушения, так как этот процесс всегда сопровождается другими видами разрушения и носит лавинообразный характер. Вырывание происходит в результате схватывания связки круга с ювенильными слоями обрабатываемой стали. Условия для схватывания обычно возникают только в отдельные моменты контакта рабочей поверхности круга с обрабатываемым материалом и им предшествует обволакивание активных элементов режущей поверхности круга частицами обрабатываемого металла, вытесненного зернами эльбора. Прочность сцепления обрабатываемого материала со связкой и зернами эльбора может превосходить прочность самой связки. В этом случае происходит отрыв некоторого объема эльбороносного слоя от режущего инструмента [4].

На рисунке 1, б показана фотография рабочей поверхности круга после шлифования с использованием предлагаемой композиции твердой смазки, а на рисунке 1, в представлена эта же поверхность круга после удаления с нее смазочного материала. Смазывание рабочей части круга полностью устраняет заволакивание её частицами металла, поэтому не происходит налипания частиц обрабатываемого металла на режущую поверхность круга и,

как следствие, вырывания объёма эльбороносного слоя. Не наблюдаются и следы прижогов на поверхности обрабатываемых сталей при всех исследуемых режимах шлифования.



**Рисунок 1 –Фотографии рабочей поверхности круга ЛО8 С1 100% С10 после шлифования стали Р9Ф5:**

*а – без твердой смазки, б, в – со смазкой, б – смазочный материал не смыт.  
Режим резания:  $V = 19$  м/с;  $S = 1$  м/мин;  $t = 0,06$  мм/дв. ход. Увеличение  $X20$*

Связка эльборового круга оказывает существенное влияние на процесс шлифования. Она удерживает зерна абразива и непосредственно контактирует с обрабатываемым материалом и стружкой, что увеличивает мощность шлифования за счёт сил трения. При нанесении смазочного материала на режущую поверхность круга значительно уменьшается коэффициент абразивного резания (с 0,41 до 0,19), что свидетельствует о значительном снижении силы трения между связкой и поверхностью обрабатываемого металла. Удельная работа шлифования, например, при обработке на режиме: скорость резания 19 м/с, продольная подача 1 м/мин и поперечная подача 0,02 мм/дв. ход, уменьшается с 280 до 190 Дж/мм<sup>2</sup>.

Эффективность шлифования смазанными кругами вызвана в основном присутствием в зоне резания нитрида бора, который входит в состав смазки и создает положительный градиент механических свойств между контактируемыми поверхностями. Появление в зоне шлифования тонкой пленки стеарина в жидком состоянии также оказывает положительное влияние на процесс резания. Кроме того, гексагональный нитрид бора взаимодействует с кислородом воздуха с образованием борного ангидрида. Тонкая пленка борного ангидрида, как и пленка стеарина, устраняет возможность непосредственного контакта зерен эльбора и связки с обрабатываемым материалом. Вследствие этого уменьшаются адгезионные и диффузионные процессы, способствующие налипанию металла на эльборовый круг, а также значительно снижаются силы трения в зоне контакта.

Кроме того, за счёт заклинивания зерен абразива в матрице связки смазочный материал способствует лучшему удержанию зерен эльбора. Об этом свидетельствуют результаты измерения твердости поверхности кругов. Твердость кругов измеряли методом вдавливания шарика на приборе Роквелла по шкале В (ГОСТ Р52587 2006). В исходном состоянии круги отбирали по твердости в результате испытания. У смазанных кругов значения твердости изменяется на одну степень выше по сравнению с исходными (см. таблицу 1). Было установлено также что разброс значений твердости кругов без нанесения смазочного материала на их поверхность достигает 64% от среднего значения по ГОСТу, то при внедрении смазочного материала в поры инструмента разброс снижается до 29%. Это объясняется тем, что в менее плотные участки эльбороносного слоя попадает больше смазочного материала.

Таким образом, уменьшение удельного расхода эльбора в случае применения смазочного материала достигается в результате уменьшения коэффициента абразивного резания и, как следствие, работы трения в зоне контакта эльборового круга с обрабатываемым материалом, а также вследствие улучшения способности связки удерживать зерна эльбора.

При этом условия износа самих зерен эльбора должны изменяться.

Поэтому проведено исследование геометрии режущей поверхности эльборового круга при введении твердого смазочного материала в его поры.

На рисунке 2 приведены графики изменения относительной опорной длины профиля от высоты рельефа режущей поверхности эльборового круга после правки и шлифования со смазкой и без нее. Правку круга осуществляли методом притирки свободным абразивным зерном на чугунной плите (размеры зерен карбида кремния соответствуют зернистости 12 по ГОСТ 3547–59).

Таблица 1 – Значения твердости эльборового круга зернистости ЛО8 (HRB)

Степень твердости круга (без смазки)	<i>M1</i>	<i>CM1</i>	<i>C1</i>	<i>CT1</i>	<i>CT3</i>
Пределы твердости	2–10 25–41	27–36 36–45	46–55 56–65	65–73 74–82	82–89 88–96
Средние значения твердости	6,0 23,0	31,5 40,5	50,5 60,5	69,0 78,5	85,5 92,0
Степень твердости круга (со смазкой)	<i>M3</i>	<i>CM2</i>	<i>C2</i>	<i>CT1</i>	<i>T1</i>
Максимальное отклонение ср.значений, %	74	22	16	12	7
Примечание: верхний ряд значений – без смазки, нижний – со смазкой					

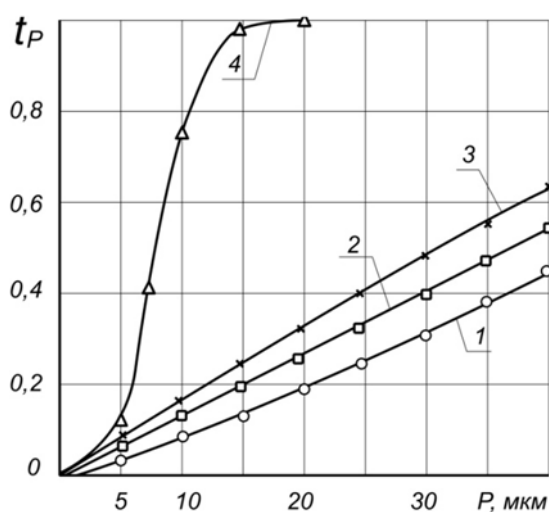


Рисунок 2 – Изменение относительной опорной длины профиля от высоты рельефа режущей поверхности круга ЛО8 С1 100% С10:

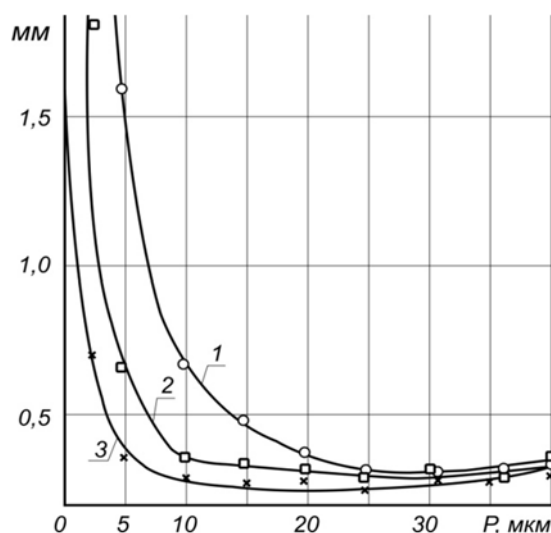
1 – после правки; 2 – после шлифования стали Р9Ф5 без твердой смазки; 3, 4 – после шлифования стали Р9Ф5 со смазкой; 4 – смазочный материал не смывает. Режим резания:  $V = 19$  м/с;  $S = 1$  м/мин;  $t = 0,06$  мм/дв.ход

Высота сглаживания профиля при шлифовании значительно уменьшается. По сравнению с исходным рельефом после правки круга наблюдается нивелирование высот вершин зерен и увеличение контактной площади рельефа.

При шлифовании с использованием смазки относительная опорная длина профиля возрастает на всех уровнях высоты рельефа режущей поверхности эльборового круга. Например, при высоте рельефа режущей поверхности круга равной 15 мкм значения относительной опорной длины профиля после правки, шлифования без твердой смазки и с ее применением, соответственно составляют 0,08; 0,12 и 0,18.

На рисунке 3 приведены данные измерения среднего шага между зернами эльбора на различных уровнях сечения профиля режущей поверхности круга после правки и шлифования.

Видно, что с увеличением высоты сечения профиля средний шаг между зернами эльбора уменьшается, а свыше 20 мкм для всех представленных случаев практически одинаков и равен 0,3 мм. На более низких уровнях сечения профиля режущей поверхности круга средний шаг между зернами после правки значительно больше, чем после шлифования. Если же сопоставить значения среднего шага между зернами при шлифовании в различных условиях, то видно, что применение смазочного материала вызывает уменьшение этой величины. Так, на высоте 5 мкм от уровня вершин зерен эльбора вглубь тела инструмента значения среднего шага между зернами после правки и шлифования без смазки и с ее применением составляют: 1,5; 0,55 и 0,35 мм. Таким образом, средний шаг между зернами эльбора при шлифовании со смазочным материалом почти в 2 раза меньше, чем без его применения.



**Рисунок 3 – Изменение среднего шага между зёрнами эльбора в круге ЛО8 С1 100% С10 на разных уровнях сечения профиля:**

*1 – после правки; 2 – после шлифования стали Р9Ф5 без твердой смазки;*

*3 – после шлифования стали Р9Ф5 со смазкой. Режим резания:  $V = 19$  м/с;  $S = 1$  м/мин;  $t = 0,02$  мм/дв.ход.*

Среднее количество вершин зерен после шлифования с использованием смазочного материала значительно больше, чем после правки и шлифования без его применения. Например, на уровне сечения профиля режущей поверхности круга ЛО8 С1100% С10, равном 10 мкм, после шлифования стали Р9Ф5 с применением твердой смазки среднее количество вершин зерен эльбора достигает 3,6 на 1 мм длины профилирования. Значения осредненного количества вершин после правки и шлифования в обычных условиях на указанном уровне сечения профиля соответственно составляют 1,5 и 2,8.

Изучение гистограммы статистических распределений размеров зерен эльбора показало, что максимальные значения количества вершин зерен эльбора после правки и шлифования обычным и смазанным кругом увеличивается (так на фиксированном уровне сечения 20 мкм количество вершин равны 110, 170 и 130 мкм).

Таким образом, износ режущей поверхности эльборового круга происходит по трем причинам:

- скалывание активных элементов зерен и их дробление;
- вырывание зерен из связки, которое обусловлено превышением сил, действующих на отдельное зерно, над силами взаимодействия зерна с материалом связки;
- истирание самой связки с обнажением новых активных элементов зерен.

Смазывание рабочей поверхности эльборового круга оказывает комплексное влияние на его режущую способность: уменьшает налипание продуктов износа (металла) на поверхность абразивного инструмента, снижает износ керамической связки, способствует заклиниванию зерен эльбора в матрице связки, изменяет условия износа активных элементов круга – зерен эльбора: снижает коэффициент абразивного резания и удельную работу шлифования. Улучшаются и показатели качества обработанной поверхности: шероховатость поверхности, величина наклепа, фазовый состав быстрорежущей стали [5, 6].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смазочно–охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник. Под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение. 2006. – 544 с.
2. Швецова, Е.Н. Классификация видов разрушения поверхности деталей в условиях сухого и граничного трения / Е.Н. Швецова, И.В. Крагельский. – Сб. «Трение и износ в машинах». – М.: Изд-во АН СССР. – 1953. – С. 18–34.
3. Кушнир, А.П. Имитационное моделирование прохождения твердого тела через преграду/А.П. Кушнир // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2015. – № 4 (9). – Т. 2. – С. 116–126.
4. Панайоти, В.А. Разработка состава твердой смазки для заточки инструмента из сверхтвердых материалов. Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении / В.А. Панайоти. – Сб. научных трудов международной научной конференции (Москва, июнь 2010 г.). – М.: Машиностроение. – 2010. – С. 173–175.
5. Панайоти, В.А. Повышение эффективности шлифования при использовании твердых смазок / В.А.

Панайоти. Научные труды 11 Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – М.: ИМАШ РАН. – 2012. – С. 337–338.

6. Панайоти, В.А. Влияние твердых смазок на фазовый состав шлифованной поверхности быстрорежущих сталей / В.А. Панайоти. Научные труды IV Международная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». ИМАШ РАН. – М.: Издательский дом «Спектр». – 2015. – С. 189–190.

7. Корнаев, А.В. Роль нанотехнологий в развитии гидродинамической теории смазки / А.В. Корнаев, Л.А. Савин, Ю.С. Степанов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 6 (302). – С. 69–74.

8. Савин, Л.А. Перспективы разработки энергоэффективной гибридной гидродинамической смазки на основе наноматериалов / Л.А. Савин, Ю.С. Степанов, А.В. Корнаев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 6 (308). – С. 60–69.

**Панайоти Владимир Александрович**

Московский технологический университет

119454 г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: lek00@mail.ru

V.A. PANAYOTI

## ANALYSIS OF THE GEOMETRY OF CUTTING SURFACES RELIEF CBN WHEELS FOR GRINDING OF SOLID LUBRICANT

*The article describes the mechanism of interaction of CBN wheel and the surface of the workpiece during grinding and set the effect of solid lubricant on the mechanical and cutting properties of the tool during grinding, shows a positive effect the lubrication of various indicators: hardness range of bundles and geometric figures of the relief cutting surface: relative to the reference length of the profile, smoothing height profile, the mean spacing between the CBN grains, the average number of peaks after the grinding grains, which reduces the abrasive cutting rate, the specific grinding work and improve the quality of the machined surface.*

**Keywords:** solid lubricant, cbn circle, high-speed steel, surface topography.

### BIBLIOGRAPHY

1. Smazochno-okhlazhdayushchiye tekhnologicheskiye sredstva i ikh primeneniye pri obrabotke rezaniyem: Spravochnik. Pod obshch. red. L.V. Khudobina. – М.: Mashinostroyeniye, 2006. – 544 s.

2. Shvetsova, Ye.N. Klassifikatsiya vidov razrusheniya poverkhnosti detaley v usloviyakh sukhogo i granichnogo treniya / Ye.N. Shvetsova, I.V. Kragelskiy. – Sb. «Treniye i iznos v mashinakh». – М.: Izd-vo AN SSSR. – 1953. – S. 18–34.

3. Kushnir, A.P. Imitatsionnoye modelirovaniye prokhozheniya tverdogo tela cherez pregradu / A.P. Kushnir // Vestnik MGTU MIREA. – 2015. – № 4 (9). – Т. 2. – С. 116–126.

4. Panayoti, V.A. Razrabotka sostava tverdoy smazki dlya zatochki instrumenta iz sverkhtverdykh materialov. Fundamentalnyye issledovaniya i innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii / V.A. Panayoti. – Sb. nauchnykh trudov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Moskva, iyun 2010 g.). – М.: Mashinostroyeniye. – 2010. – С. 173–175.

5. Panayoti, V.A. Povysheniye effektivnosti shlifovaniya pri ispolzovanii tverdykh smazok / V.A. Panayoti. Nauchnyye trudy 11 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Fundamentalnyye issledovaniya i innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii». – М.: IMASH RAN. – 2012. – С. 337–338.

6. Panayoti, V.A. Vliyaniye tverdykh smazok na fazovyy sostav shlifovannoy poverkhnosti bystrozrezhushchikh staley / V.A. Panayoti. Nauchnyye trudy IV Mezhdunarodnaya konferentsiya «Fundamentalnyye issledovaniya i innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii». IMASH RAN. – М.: Izdatelskiy dom «Spektr». – 2015. – С. 189–190.

7. Kornayev, A.V. Rol nanotekhnologiy v razvitii gidrodinamicheskoy teorii smazki / A.V. Kornayev, L.A. Savin, YU.S. Stepanov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 6 (302). – С. 69–74.

8. Savin, L.A. Perspektivy razrabotki energoeffektivnoy gibridnoy gidrodinamicheskoy smazki na osnove nanomaterialov / L.A. Savin, YU.S. Stepanov, A.V. Kornayev // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2014. – № 6 (308). – С. 60–69.

**Panayoti Vladimir Aleksandrovich**

Moscow Technological University, Moscow

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

E-mail: lek00@mail.ru

В.И. ЛАВРИНЕНКО, В.А. СКРЯБИН, О.О. ПАСИЧНЫЙ, В.Ю. СОЛОД, А.А. СЫТНИК

## ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ИХ ОБРАБАТЫВАЕМОСТЬ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

*Рассмотрены вопросы влияния свойств инструментальных твердых сплавов на их обрабатываемость применительно к процессам алмазной обработки шлифовальным инструментом. Приведены сведения по конкретным величинам свойств наиболее характерных марок твердых сплавов. Показано, что основными свойствами, определяющими обрабатываемость спеченных твердых сплавов, являются – плотность, твердость, предел прочности при изгибе, коэрцитивная сила, а также такие характеристики как степень пористости и размер зерна карбидной фазы.*

**Ключевые слова:** твердые сплавы, алмазная обработка, шлифовальные круги, обрабатываемость, свойство, твердость, предел прочности при изгибе, коэрцитивная сила.

Наряду с инструментальными сталями твердые сплавы являются наиболее распространенным инструментальным материалом. Так, например, в промышленности США и Западной Европы их доля составляет 45...57 % от общего объема выпуска. При этом, 90% многогранных режущих пластин в США, Западной Европе и Японии изготавливают из вольфрамокобальтовых твердых сплавов, которые могут иметь кроме того карбиды титана, тантала и ниобия без покрытий, или вольфрамокобальтовые твердые сплавы с покрытиями  $TiC$ ,  $Ti(CN)$ ,  $Zr(CN)$ ,  $TiN$ ,  $Al_2O_3$  [1]. Основными характеристиками, определяющими качество спеченных твердых сплавов, являются – плотность, твердость, предел прочности при изгибе, степень пористости, размер зерна карбидной фазы и толщина кобальтовой прослойки. Плотность твердых сплавов состоит аддитивно из плотностей  $WC$  и  $Co$ . Значения плотности спеченных изделий ниже расчетных на 0,5–3,0 % из-за наличия в сплаве дефектов. При испытаниях на приборе Роквелл значения твердости практически всех промышленных марок твердых сплавов вкладываются в диапазон 6...8 ед.  $HRA$ . Поэтому задача установления какой-либо корреляции между твердостью и параметрами макроструктуры твердых сплавов является проблематичной. Вместе с тем, между средними показателями твердости и границей текучести при одноосном сжатии наблюдается линейная связь и с ростом твердости граница текучести повышается. В связи с этим, исследования на твердость  $HRA$  характеризуют средний уровень механических свойств сплавов. Величина коэрцитивной силы твердых сплавов определяется не только количеством, а и состоянием связующей фазы, представляющей собой твердый раствор вольфрама и углерода в кобальте. Трещиностойкость материала определяется как способность конструкционного элемента, содержащего трещину или частично поврежденного, выдерживать нагружение и не разрушаться полностью. Эта способность описывается напряженным состоянием у вершины трещины перед окончательным разрушением –  $K_{Ic}$ . В отличие от других механических характеристик эта величина не зависит от размеров изделия, от состояния их поверхностного слоя, от наличия в них дефектов типу пор или включений графита. При прочих равных условиях параметр  $K_{Ic}$  может быть критерием состояния связующей фазы. Так, для твердых сплавов эта величина линейно растет с увеличением содержания кобальта в сплаве и повышается с ростом зерна кобальтовой прослойки [2].

Среди свойств твердых сплавов только коэрцитивная сила оказалась единственной характеристикой, связь с которой однозначно характеризует износостойкость сплавов при абразивном изнашивании (по карбиду кремнию). С возрастанием коэрцитивной силы износостойкость в этом случае линейно растет [3].

Для твердых сплавов характерным является наличие остаточных напряжений в их фазах, вызванных неоднородностью теплофизических свойств фаз, составляющих инструментальный композит (микромеханизм), и неоднородностью свойств поверхностного слоя и глубинных слоев (макромеханизм). Расчетные средние остаточные термонапряжения в фазах твердых сплавов  $WC-Co$  находятся в диапазонах – для кобальтовой фазы (напряжения сжатия) у BK4 – 1616 МПа, а у BK25 – 1207 МПа; для карбидной фазы



(напряжения растяжения) у ВК4 – «–112 МПа», а у ВК25 – «–709 МПа». Эти напряжения являются характерными для глубинных слоев. А для поверхностных слоев в целом напряжения являются меньшими приблизительно в 2 раза. В исходном состоянии (после спекания) сплава ВК20 у поверхностном слое исследованных пластинок выявлены небольшие (до 300 МПа) напряжения растяжения в кобальте и напряжения сжатия (около 200 МПа) у карбидной фазе [4].

В исходном состоянии (после спекания) твердого сплава карбидная фаза находится под влиянием напряжений сжатия, а кобальтовая – напряжений растяжения. Средние остаточные термонапряжения в фазах твердых сплавов *WC-Co* находятся в диапазонах – для кобальтовой фазы (напряжения сжатия) у ВК6 – 2200 МПа, ВК15 – 870 МПа, а ВК25 – 530 МПа; для карбидной фазы (напряжения растяжения) у ВК6 – «–100 МПа», ВК15 – «–220 МПа», а ВК25 – «–260 МПа» [5].

Для повышения эксплуатационных свойств многогранных пластин и монолитного инструмента из твердых сплавов применяются современные износостойкие покрытия (таблица 1). Классификация [6]: *CVD* – покрытия, нанесенные с помощью химических методов, *PVD* – покрытия, нанесенные с помощью физических методов, *ND* – алмазное покрытие.

Таблица 1 – Физико–механические свойства износостойких покрытий [7]

Покр ытие	Микро– твердость, ГПа	Модуль упруго– сти, ГПа	Поверхност– ная энергия, Дж/м <sup>2</sup>	Коэффициент интен– сивности напряжений, $K_C \cdot 10^6, Н/м^2$	Коэффициент трещиностой– кости*
<i>TiN</i>	21,2	350,9	4,43	1,47	0,77
<i>TiCN</i>	31,1	370,0	5,61	1,85	0,67
<i>TiZrN</i>	41,5	420,0	6,60	2,19	0,44
<i>TiAlN</i>	31,7	350,9	5,69	1,89	0,65
<i>TiFeN</i>	22,7	301,3	4,51	1,50	0,70
<i>TiMoN</i>	38,0	377,4	6,28	2,08	0,76

\* Чем меньше коэффициент, тем больше и трещиностойкость

Градиенты контактной температуры при высокоскоростном резании инструментами с фрикционными покрытиями нитридов и карбидов титана выше в 1,5–3 раза, чем градиенты температур, характерные для инструментов без покрытия. При этом температура режущего клина как у инструмента с покрытиями, так и у инструментов без покрытия разнится незначительно. В то же время, максимальная температура на передней поверхности лезвия с фрикционным покрытием обычно превышает на 15–30% соответствующую температуру в случае отсутствия покрытия. В клине резания при точении сталей на нормативных режимах резания имеет место высокая теплонапряженность, что соответствует тепловым потокам, равным  $(1...20) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$  и коэффициентам конвективного теплообмена от задней поверхности лезвия инструмента к воздуху  $\alpha = (5...40) \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$  [8]. Коэффициенты теплообмена (теплопередачи) в покрытиях: *TiN* –  $(8...9,5) \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , *TiCN* –  $(6,5...9) \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , *TiAlN* –  $(6...7) \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , а это обозначает, что именно последнее обеспечивает достаточную теплоизоляцию [9].

Ниже приводим примеры характеристик и свойств некоторых марок твердых сплавов (в полном виде для всех марок сплавов информация приведена в справочнике [1]):

**ВК6** – твердый сплав вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза *WC* – 94, фаза *Co* – 6. По ТУ 48–19–165–84 должно быть: степень пористости, %, не более чем 0,2; содержание свободного углерода, %, не более чем 0,2; содержание графита, %, не более как 0,5; фаза *WC*: величина зерна, мкм – 1...2; наличие фазы типа  $\eta$  (двойного карбида вольфрама и кобальта кружевной и озерковой форм) недопустимо; пустоты, более чем 50 мкм допускаются суммарной протяженностью до 200 мкм.

Свойства: плотность,  $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 14,6...15,0 [10]; усредненный размер частичек *WC*, мкм – 1...2 [11]; усредненный размер прослойки кобальта, мкм – 0,42 [11]; твердость, *HRA* – 88,5 [10]; твердость, *HV*, ГПа – 15,0; модуль упругости, ГПа – 628 [11]; коэффициент Пуассона – 0,174 [12]; предел прочности при изгибе, ГПа – 1,65; предел прочности при сжатии, ГПа – 5,0 [11]; предел прочности при растяжении, ГПа – 0,588; предел прочности

при кручении,  $GPa$  – 0,882 [13]; предел текучести,  $GPa$  – 4,4 [12]; предел текучести при непропорциональном удлинении,  $GPa$  – 0,686 [13]; вязкость разрушения,  $MПа \cdot м^{0,5}$  – 12,1 [5]; работа деформации сплава,  $МДж/м^3$  – 69; коэффициент энергопоглощаемости, являющийся отношением работы пластичной составляющей к упругой при деформации сплава – 1,0 [11]; теплопроводность,  $Вт/(м \cdot К)$  – 60–61; температуропроводность,  $\cdot 10^5 м^2/с$  – 1,97–2,20; теплоемкость,  $Дж/(кг \cdot К)$  – 186–193 [14]; удельное электросопротивление,  $мкОм \cdot м$  – 0,206; КЛТР,  $10^{-6} \cdot град^{-1}$  – 5 [13]; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 10,4–14,0 [2]; массовый электрохимический эквивалент,  $\cdot 10^{-6} кг/(А \cdot с)$  – 0,292; объемный электрохимический эквивалент,  $\cdot 10^{-10} м^3/(А \cdot с)$  – 0,198 [15].

Технологические особенности – температура спекания,  $^{\circ}C$  –  $1420 \pm 40$  (в среде водорода),  $1400 \pm 20$  (в вакууме); время выдержки, *мин* – 40–60 (в среде водорода), 40–60 (в вакууме) [16].

Подгруппа применения по *ICO* – K15–K25. Аналог – MC321. Применение – получистовое и черновое точение и растачивание при непрерывном резании, чистовая обработка при прерывистом резании, рассверливание и сверлении отверстий, зенкерование и предварительное развертывание серых чугунов, цветных металлов и их сплавов, пластмасс со средними скоростями резания и сечениями среза [17].

Аналог – **MC321** – твердый сплав титановольфрамовой группы с составом, масс. %: фаза *WC* – 92,0, раствор *TaNbC* – 2,0, фаза *Co* – 6,0; плотность,  $\cdot 10^3 кг/м^3$  – 14,61–14,86; твердость, *HV*,  $GPa$  – 14,5–16,0; предел прочности при изгибе,  $GPa$  – 1,323; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 13,1–15,5 (аналог фирмы «Сандвик» – *H20*).

Аналог – **MC318** – плотность,  $\cdot 10^3 кг/м^3$  – 12,80–12,96; твердость, *HV*,  $GPa$  – 15,75–17,25; предел прочности при изгибе,  $GPa$  – 1,47; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 15,5–19,9.

Аналог – **MC313** – плотность,  $\cdot 10^3 кг/м^3$  – 14,74–14,94; твердость, *HV*,  $GPa$  – 15,05–16,55; предел прочности при изгибе,  $GPa$  – 1,274; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 13,1–17,1.

Аналог – **MC312** – плотность,  $\cdot 10^3 кг/м^3$  – 12,79–12,95; твердость, *HV*,  $GPa$  – 17,0–19,4; предел прочности при изгибе,  $GPa$  – 1,274; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 15,9–23,9.

Аналоги: MC321, MK2 (МКТС), K20 (*Hertel*), H1P (*Sandvik*). Применение: черновая и получистовая обработка серого та ковкого чугуна. ВК6 с покрытием *TiN–TiC/N–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* – MC3210, MA3 (МКТС), GC-3015 (*Sandvik*). Применение: марка с износостойким покрытием для чистовой и получистовой обработки чугуна, в т.ч. ковкого и с сфероидальным графитом. ВК6 с покрытием *TiN–TiC/N–TiN* – MC3216, MF3 (МКТС). Применение: марка с износостойким покрытием для фрезерования серого и ковкого чугуна [18].

**ВК6М** – твердый сплав вольфрамовой группы с мелкозернистой структурой, фазовый состав, масс. %: фаза *WC* – 94, фаза *Co* – 6.

Свойства: плотность,  $\cdot 10^3 кг/м^3$  – 14,8–15,1 [10, 19]; пористость, % – до 0,2 [20]; диаметр частичек *WC*, *мкм* – 1,6 [21]; твердость, *HRA* – 90 [10, 11, 19]; твердость *HV*,  $GPa$  – 16,5 [19]; модуль упругости,  $GPa$  – 640 [19, 20]; модуль сдвига,  $GPa$  – 262; коэффициент Пуассона – 0,22 [19]; предел прочности при изгибе,  $GPa$  – 1,35 [19, 22]; предел прочности при сжатии,  $GPa$  – 4,9 [19, 20]; теплопроводность,  $Вт/(м \cdot К)$  – 50 [20]; КЛТР,  $10^{-6} \cdot град^{-1}$  – 5 [19]; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 15,9...19,9 [22].

Технологические особенности – температура спекания,  $^{\circ}C$  –  $1370 \pm 20$  (в среде водорода),  $1380 \pm 20$  (в вакууме); время выдержки, *мин* – 30...40 (в среде водорода), 30...40 (в вакууме) [16]; температура спекания,  $^{\circ}C$ , 1390; время размола, *час* – 96 [22].

Применение – обработка резанием, получистовое точение жаропрочных сталей и сплавов, нержавеющей сталей аустенитного класса, закаленного чугуна, твердой бронзы, сплавов легких металлов, абразивных неметаллических материалов, пластмасс, бумаги, стекла. Обработка закаленных сталей, а также сырых углеродных и легированных сталей при тонких сечениях среза при достаточно невысоких скоростях резания. Сухое волочение проволоки из стали, цветных металлов и их сплавов. Легкоизнашиваемые детали машин и приборов, измерительный инструмент, работающий без ударных нагрузок [10].

Аналог – **MC313** – твердый сплав титановольфрамовой группы состава, об. %: фаза *WC* – 90,9, раствор *TaNbC* – 4,0, фаза *Co* – 5,1; плотность,  $\cdot 10^3 кг/м^3$  – 14,74–14,94; твердость, *HV* – 15,05–16,55; предел прочности при изгибе,  $GPa$  – 1,27 (аналог фирмы «Сандвик» – *H13*).

**ВК60М** – твердый сплав ультрамелкозернистой структуры вольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза  $WC$  – 92, фаза  $Co$  – 6,  $TaC$  – 2 [10].

Свойства: плотность,  $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 14,7–15,0 [10, 22]; пористость, % – до 0,2 [22]; % зерен размером до 1 мкм – 75 [23]; размер зерен карбида вольфрама, мкм – 1,4 [22]; твердость,  $HRA$  – 90,5 [10, 22]; микротвердость,  $HV_{20}$  – 16,5–18,0 [24]; предел прочности при изгибе,  $GPa$  – 1,2 [22]; удельное электросопротивление,  $мкОм \cdot м$  – 0,012 [24]; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 22,3–26,3 [22].

Технологические особенности – температура спекания,  $^{\circ}C$  – 1390; продолжительность размола, час – 96 [22].

Подгруппа применения по  $ISO$  – M05 – M15 (K05 – K15). Маркировка ВНИИТС (Россия) – BT210. Применение – чистовая и получистовая обточка и растачивание; нарезание резьбы, развертывание легированных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов; сплавов алюминия с большим содержанием кремния, неметаллических материалов при высоких скоростях резания и малых сечениях среза. Используется для изготовления мелкогабаритного осевого инструмента – сверл, метчиков, разверток [17].

Аналог – **MC306** – твердый сплав титановольфрамовой группы состава, масс. %: фаза  $WC$  – 93,6, раствор  $TaNbC$  – 0,4, фаза  $Co$  – 6,0; плотность,  $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 14,71–14,94; твердость,  $HV$ ,  $GPa$  – 16,65–18,35; предел прочности при изгибе,  $GPa$  – 1,225; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 19,5–23,5 (аналог фирмы «Сандвик» – H10).

Аналог – **MC211** – плотность,  $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 14,70–14,86; твердость,  $HV$ ,  $GPa$  – 15,9–16,8; предел прочности при изгибе,  $GPa$  – 1,47; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 15,9–24,7.

Аналоги: MC306, MK0 (MKTС), KMI (Hertel), HIP (Sandvik). Применение: чистовая обработка чугуна, в т.ч. отбеленного, цветных металлов, пластмасс при высоких скоростях резания и малых сечениях среза [18].

**T15K6** – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: фаза  $WC$  – 39, раствор  $TiC-WC$  – 50, фаза  $Co$  – 11; размер зерен основной фракции, мкм: фаза  $WC$  – 1–2, раствор  $TiC-WC$  – 2–5, толщина прожилок фазы  $Co$  – 11 [25]; фазовый состав, масс. %: фаза  $WC$  – 79, фаза  $TiC$  – 15, фаза  $Co$  – 6 [10, 13].

Свойства: плотность,  $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 11,0–11,7 [19]; усредненный размер частичек карбидной фазы, мкм – 2...5 [26]; размер зерен карбидной фазы, мкм:  $WC$  – 2,33,  $TiC$  – 3,6 [27]; твердость,  $HRA$  – 90 [10, 19, 26]; твердость,  $HV$ ,  $GPa$  – 15–16 [19]; модуль упругости,  $GPa$  – 530 [25, 26]; модуль сдвига,  $GPa$  – 227; коэффициент Пуассона – 0,21 [19]; предел прочности при изгибе,  $MPa$  – 1150 [15, 20, 26]; предел прочности при сжатии,  $GPa$  – 4,3 [25, 26]; предел прочности при растяжении,  $GPa$  – 49; предел прочности при кручении,  $GPa$  – 73,5 [13]; вязкость разрушения,  $MPa \cdot м^{0,5}$  – 7,2 [28]; ударная вязкость,  $кДж/м^2$  – 19,8 [25]; трещиностойкость,  $MPa \cdot м^{0,5}$  – 8,5–10,8 [20]; теплопроводность,  $Вт/(м \cdot K)$  – 27,2 [13, 15]; температуропроводность,  $\cdot 10^5 \text{ м}^2/с$  – 1,1 [29]; удельная теплоемкость,  $кДж/(кг \cdot K)$  – 0,209...0,226; удельное электросопротивление,  $мкОм \cdot м$  – 0,399 [13]; КЛТР,  $10^{-6} \cdot град^{-1}$  – 5,5–5,6 [19]; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 12,2 [25]; массовый электрохимический эквивалент,  $\cdot 10^{-6} \text{ кг}/(А \cdot с)$  – 0,277; объемный электрохимический эквивалент,  $\cdot 10^{-10} \text{ м}^3/(А \cdot с)$  – 0,243 [15]; теплостойкость,  $^{\circ}C$  – 850–900 [30]; термостойкость на воздухе,  $^{\circ}C$  – 600 [20].

Подгруппа применения по  $ISO$  – P10–P20. Маркировка ВНИИТС (Россия) – BT110, а в случае покрытия  $TiC$  – BT112. Применение – получистовое точение углеродистых, конструкционных и легированных сталей, стального литья при непрерывном резании; чистовая расточка и точение; чистовая обработка при прерывистом резании; зенкерование и развертывание с высокими скоростями резания и средними сечениями срезу [17].

Аналог – **MC111** – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: фаза  $WC$  – 36,5, раствор  $TiC-WC$  – 38,0, раствор  $TaNbC$  – 16,0, фаза  $Co$  – 9,5; плотность,  $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 10,22–10,68; твердость,  $HV$ ,  $GPa$  – 15,25–16,75; предел прочности при изгибе,  $MPa$  – 1127; коэрцитивная сила,  $кА/м$  – 8,7–11,9 (аналог фирмы «Сандвик» – SIP).

Аналоги: MC111, MP1 (MKTС), P10 (Hertel), SIP (Sandvik). Применение: черновая и получистовая обработка стали [18].

**TT10K8B** – твердый сплав титанотанталовольфрамовой группы, фазовый состав, масс. %: фаза  $WC$  – 82, фаза  $Co$  – 8, фаза  $TiC$  – 3, фаза  $TaC$  – 7 [10].

Согласно ТУ 48–19–160–75 должно быть: степень пористости, %, не более чем 0,2; содержание графита, %, не более как 0,5; фаза *WC*: величина зерна, *мкм* – 1–2, количество зерен, %, не менее как 50; наличие фазы типа  $\eta$  (двойного карбида вольфрама и кобальта кружевной и озерковой форм) не допустимо; пустоты, более чем 50 *мкм* не допускаются.

Свойства: плотность,  $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 13,5–13,8; твердость, *HRA* – 89; предел прочности при изгибе, *МПа* – 1617 [10]; коэрцитивная сила, *кА/м* – 7,95–11,1; вязкость разрушения, *МПа·м<sup>0,5</sup>* – 8,6 [28].

Аналог – **MC221** – твердый сплав титановольфрамовой группы, фазовый состав, об. %: фаза *WC* – 83,3, раствор *TiC–WC* – 5,2, раствор *TaNbC* – 6,0, фаза *Co* – 5,5; плотность,  $\cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 13,81–13,97; твердость, *HV*, *ГПа* – 15,5–16,3; предел прочности при изгибе, *МПа* – 1372; коэрцитивная сила, *кА/м* – 10,3–13,7 (аналог фирмы «Сандвик» – *SH*).

Аналоги: MC221, MM2 (МКТС). Применение: черновая и получистовая обработка легированной стали, стального литья, марганцовистой и колесной сталей. TT10K8Б с покрытием *TiN–TiC/N–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* – MC2210, MA1 (МКТС), CP313E (*Hertel*), GC3015 (*Sandvik*). TT10K8Б с покрытием *TiN–TiC/N–TiN* – MC2215, MT1 (МКТС), CM2 (*Hertel*), GS425 (*Sandvik*). Применение: с износостойким покрытием для чистовой и получистовой обработки стали [18].

Подгруппа применения по ISO – M20–M30. Маркировка ВНИИТС (Россия) – BT220. Применение – получистовое и черновое точение, растачивание, строгание и сверления ковкого чугуна, серого чугуна с шаровидным графитом, высоколегированной вязкой стали та стального литья, автоматной стали, нержавеющей, марганцовистых сталей и жаропрочных сплавов, в т.ч. при обработке по копиру со средними сечениями среза. Получистовое фрезерование ковкого чугуна, серого чугуна с шаровидным графитом, высоколегированных нержавеющей и жаропрочных сталей [17].

Укажем, что среди современных твердых сложнолегированных сплавов есть такие, обработка которых значительно усложнена. К ним относятся сплавы легированные карбидами тантала и ванадия: группа ТТК (ТТ20К9, ТТ8К6, ТТ10К8Б и др.) и сплавы типа ОМ (ВК6 ОМ, ВК10 ОМ, ВК10 ХОМ) (ОМ – означает, что твердый сплав дополнительно легирован карбидами *VC* и *TiC*. ХОМ – обозначает, что твердый сплав типа ОМ еще дополнительно легирован *Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>*. ХТМ – обозначает, что твердый сплав типа ОМ еще дополнительно легирован карбидами *Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>*, *TiC* и *MoC*). В значительной степени это связано с тем, что дополнительное легирование карбидами ванадия и титана способствует формированию тонкозернистых твердых сплавов, в которых размер зерен не превышает 1 *мкм*. При этом, повышается сопротивление пластическому деформированию сплава, но ухудшается их шлифуемость. Укажем также, что в литературе существуют значительные разногласия в рекомендациях касающихся путей достижения высокоточной и эффективной технологии шлифования современных сложнолегированных сплавов. Практически отсутствуют данные по связи свойств твердых сплавов с исходными показателями технологий. Между тем, нашими исследованиями установлено, что описанное выше легирование значительно повышает износ алмазных кругов и шероховатость обработанной поверхности (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные данные по обрабатываемости твердых сплавов

Марка твердого сплава	Сравнительные коэффициенты (ВК6 – 1,0)		
	Относительный расход алмазов	Эффективная мощность шлифования	Шероховатость обработанной поверхности по параметру <i>Ra</i>
ВК3М	0,92	0,56	1,31
ВК6	1,00	1,00	1,00
ВРК15	1,28	0,80	0,81
ТТ10К8Б	1,38	0,80	1,33
ТТ21К9	1,62	0,95	0,44
ТТ8К6	1,66	0,60	1,42
ВК6 ОМ	3,92	0,70	1,16
ВК10 ОМ	4,38	0,75	1,61
ВК10 ХОМ	6,85	0,60	1,59

Особенности алмазной обработки твердых сплавов рассмотрены нами ниже для разных условий такой обработки. Важным фактором оценки таких особенностей является влияние свойств твердых сплавов на их обрабатываемость. Нами получен ряд корреляционных зависимостей, отражающих характер тенденций влияния свойств твердых сплавов на износ (относительный расход алмазов –  $q_p$  в кругах) кругов при их шлифовании:

– с ростом, соответственно, плотности  $\rho$ , твердости  $H_{mc}$  и прочности при изгибе  $R_{bm}$  сплавов расход алмазов снижается:

$$q_p = 5,1 - 35,5 \cdot \rho, \quad q_p = 68,69 - 0,73 \cdot H_{mc}, \quad q_p = 1,049 + 2117,24/R_{bm};$$

– с возрастанием коэрцитивной силы ( $K_c$ ) расход алмазов растет:

$$q_p = 4,323 - 24,26/K_c;$$

– увеличение величины зерен карбидной фазы ( $Z_{kf}$ ) приводит к снижению расхода алмазов в круге:

$$q_p = -0,371 + 3,33/Z_{kf}.$$

В связи с изложенным выше обращено внимание на усилия резания при шлифовании твердых сплавов и, при этом, нами определено, что наряду с реальными значениями составляющих усилия резания большое внимание следует также уделять такой характеристике как коэффициент абразивного резания –  $fa = P_z/P_y$ .

Исследованы 15 марок наиболее распространенных твердых сплавов и установлено (таблица 3), что наименьшие усилия шлифования возникают при обработке сплава Т5К10, а наибольшие – при обработке сплава ВРК15. А вот  $fa$  изменяется мало и находится в диапазоне 0,30–0,35. Установлено, что в диапазоне относительных концентраций алмазов в круге от 50 до 125 % коэффициент  $fa$  возрастает. Аналогично он себя ведет и с ростом зернистости от 40/28 до 125/100, то есть с возрастанием зернистости и концентрации СТМ  $fa$  повышается.

Таблица 3 – Влияние марки твердых сплавов на составляющие усилия резания и коэффициент абразивного резания ( $v_{kp}=15$  м/с,  $S_{nod}=0,5$  м/мин,  $S_n=0,25$  мм/дв.х.,  $Q=660$  мм<sup>3</sup>/мин, круг АС4 100/80МА–В1–11П–100)

Твердый сплав	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$N_{эф}$ , кВт	$fa$
Т8К6	103	31	0,50	0,301
ТТ21К9	138	42	0,75	0,304
МС321	124	38	–	0,306
ВРК15	145	45	0,75	0,310
ВК8	105	33	0,55	0,314
ВК6 ОМ	143	45	0,70	0,315
Т15К6	98	31	0,55	0,316
ВК10 ХОМ	138	45	0,75	0,326
ВК10 ОМ	136	45	0,70	0,331
ВК3М	124	41	0,65	0,331
Т5К10	89	30	0,50	0,337
МС146	166	56	–	0,337
МС111	109	37	–	0,339
ТТ8К7	122	42	0,70	0,344
ТТ10К8Б	107	37	0,55	0,346

Также выявлено, что с ростом скорости вращения круга и глубины шлифования коэффициент абразивного резания  $fa$  снижается.

Изучена связь износа круга с коэффициентом  $fa$  при шлифовании твердого сплава ВК6ОМ кругом АС4 63/50ма–В1–11П–125 при производительности 174 мм<sup>3</sup>/мин. Установлено, что с ростом  $fa$  износ круга снижается:

$$q_p = 149,58 - 467,16 \cdot fa.$$

Рассмотрим теперь тепловые закономерности при шлифовании твердых сплавов. На температуру в зоне обработки  $T$  влияют все параметры режимов шлифования, определяющие производительность процесса  $Q$ , в том числе продольная подача, поскольку от нее зависит толщина слоя материала, снимаемого за оборот круга. Обычно с повышением  $Q$  наблюдается возрастание температуры шлифования. Известны две формы кривых  $T=f(Q)$ : прямая линия и

квадратичная зависимость. Нашими исследованиями подтверждено, что в достаточно широком диапазоне значений  $Q$  температура в зоне обработки изменяется по квадратичной зависимости, которую возможно условно разделить на две части. Сначала (до  $\sim 1800$  мм<sup>3</sup>/мин), повышение температуры несколько сдерживается тем, что с повышением производительности возрастает площадь контакта пластины твердого сплава с алмазными зернами, которые одновременно являются эффективными теплоносителями. Далее ( $Q > 1800$  мм<sup>3</sup>/мин) становится более значительным контакт связки круга с материалом, что приводит к выделению дополнительного количества тепла, не связанного непосредственно с работой резания. Вместе с тем, в приведенной форме кривой является определенное противоречие с теоретическими взглядами на температуру в зоне резания. Преимущественно [29], температура связывается с тангенциальной составляющей усилия резания и теоретические расчеты проводится на основе  $P_z$ . Однако, применительно к условиям, когда производительность непостоянна, такой корреляции между  $P_z$  и  $T$  не наблюдается: температура растет быстрее чем сила. Этот вывод подтверждают и экспериментальные данные работ [29]. Представляется, что для более точного анализа температур необходимо учитывать не только составляющую  $P_z$ , а также  $P_y$  и  $P_x$  и их соотношение.

В нашем случае анализу были подвергнуты сплавы групп МС, ВК и ТК. Выявлено, что для условий шлифования твердых сплавов кругами на полимерных связках формула зависимости температуры от производительности обработки имеет вид:

$$T = 108 \cdot k_m + 2,53 \cdot 1,004076^Q.$$

где  $k_m$  – коэффициент тепловой характеристики твердых сплавов, который характеризует сдвиг кривой «производительность–температура» вдоль оси ординат. Нами проведены эксперименты по установлению относительного коэффициента, который бы характеризовал интегральную тепловую характеристику твердых сплавов применительно к их шлифованию и давал бы возможность прогнозировать уровень температур в зоне обработки при шлифовании разных сплавов. Установлена, статистическая связь между исследованным коэффициентом  $k_m$  и свойствами твердых сплавов. Так, уровень температур шлифования и  $k_m$  возрастают с: повышением плотности сплавов –  $k_m = -10,33/(-25,7 + \gamma)$  (погрешность 10,8 %), увеличением прочности при изгибе –  $k_m = -623,9/(-2118,46 + R_{bm})$  и снижаются с: повышением твердости сплавов –  $k_m = 7,4636 - 7,412 \cdot 10^{-2} H_{mc}$  (погрешность 23,4%), возрастанием коэрцитивной силы –  $k_m = K_c/(1,93 \cdot K_c - 16,989)$  (погрешность 5,8%).

Выше уже было обращено внимание на то, что ориентация только на учет составляющей  $P_z$  не вполне отражает тепловые закономерности процесса. Поэтому, нами рассмотрена связь между коэффициентом абразивного резания ( $fa$ ) и температурой шлифования при одинаковой производительности обработки. Выявлено, что для твердых сплавов такая корреляционная зависимость имеет вид:  $T = 109,29 + 129,78 \cdot fa$ , и, таким образом, с возрастанием  $fa$  температура в зоне обработки повышается. Это следует иметь ввиду, поскольку в [31] установлено, что для повышения износостойкости кругов необходимо стремиться к увеличению значения  $fa$ . В свою очередь, выявлена в [31] зависимость относительного расхода алмазов при шлифовании твердых сплавов от температуры в зоне обработки, имеющая с погрешностью 10,8 % вид:  $q = -27,29 + 5,965 \cdot \ln T$ . Видно, что чем больше температура, тем больше и износ, однако с ростом температуры прирост износа снижается, вероятно, за счет «облегчения» процесса резания при более высоких температурах.

В окончание выше изложенного обратим внимание на влияние свойств твердых сплавов и на шероховатость их обработанной поверхности. Установлено, что шероховатость шлифованной поверхности твердых сплавов имеет определенную корреляционную связь с их физическими свойствами. Так, с увеличением плотности и коэрцитивной силы твердых сплавов шероховатость повышается:

$$Ra = 1/(2,204 + 5,87 \cdot 10^5 e^{-\rho}), \quad Ra = 0,208 + 1,068 \cdot 10^{-2} K_c.$$

С увеличением твердости, прочности при изгибе и величины зерен карбидной фазы шероховатость снижается:

$$Ra = 3,72 - 3,74 \cdot 10^{-2} H_{mc}, \quad Ra = 0,4004 - 1,96 \cdot 10^{-5} R_{bm}, \quad Ra = 0,555 - 0,146 \cdot Z_{mc}.$$

Таким образом, в результате проведенных исследований показано, что свойства твердых сплавов оказывают определенное влияние на износ круга, силовые и тепловые

показатели, а также шероховатость обработанной поверхности. Установленные зависимости позволяют в целом прогнозировать обрабатываемость твердых сплавов, особенно в тех случаях, когда обрабатывается их широкая номенклатура в условиях мелкосерийного производства и необходим выбор оптимального алмазного инструмента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавріненко, В.І. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: Енциклопедичний довідник / В.І. Лавріненко, М.В. Новіков / Під заг. ред. акад. М.В. Новікова. – Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.
2. Лошак, М.Г. Критерии долговечности твердосплавных элементов аппаратов высокого давления для синтеза сверхтвердых материалов / М.Г. Лошак // Сверхтвердые материалы. – 2002. – № 4. – С. 61–70.
3. Виноградов, В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
4. Літошенко, Н.В. Закономірності впливу залишкових термічних мікронапружень та дисперсії розмірів карбідних зерен на деформаційні характеристики твердих сплавів WC-Co: Автореф. ... канд. техн. наук. – К.: ИСМ НАН України, 2002. – 23 с.
5. Рентгенографическое исследование термообработанных твердых сплавов WC – Co / Л.И. Александрова, М.Г. Лошак, Т.Б. Горбачева, А.В. Варакина // Порошковая металлургия. – 1986. – № 5. – С. 93–98.
6. Работягин, Ю.Д. Современные инструментальные материалы и режущий инструмент для эффективной обработки / Ю.Д. Работягин // ИТО: инструмент, технология, оборудование. – 2000. – № 2. – С. 86–88.
7. Табаков, В.П. Разработка многослойных покрытий для условий прерывистого резания / В.П. Табаков, М.Ю. Смирнов, А.В. Циркин // Резание и инструмент в технологических системах. – 2005. – Вып. 69. – С. 301–310.
8. Крюков, В.К. Роль контактной среды в повышении работоспособности прецизионного инструмента / В.К. Крюков, Н.В. Крюков // Резание и инструмент. – 1998. – Вып. 47. – С. 130–131.
9. Попке, Г. Резервы рационализации при нанесении покрытий на инструмент / Г. Попке, Л. Дюбнер, Т. Эммер // Резание и инструмент в технологических системах. – 1996. – Вып. 50. – С. 142–149.
10. ГОСТ 3882–74 «Сплавы твердые спеченные. Марки».
11. Лисовский, А.Ф. Формирование градиентной структуры в спеченных твердых сплавах (Обзор) / А.Ф. Лисовский // Сверхтвердые материалы. – 2010. – № 4. – С. 36–53.
12. Моделювання термомеханічного стану елементів апарата високого тиску для синтезу алмазів з розвинутою поверхнею / М.В. Новіков, О.І. Боримський, О.О. Лешук та ін. // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 4. – С. 3–15.
13. Исследования и опыт внедрения скоростного резания металлов минералокерамическими инструментами. – Горький, 1957. – 87 с.
14. Теплопроводность и износ твердосплавных режущих элементов после термической обработки / М.Е. Дудкин, М.Г. Лошак, Т.Д. Оситинская, В.В. Миклушис // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 2. – С. 35–38.
15. Лавриненко, В.И. Электрошлифование инструментальных материалов. – К.: Наукова думка, 1993. – 152 с.
16. Муха, И.М. Твердые сплавы в мелкосерийном производстве / И.М. Муха. – К.: Наукова думка, 1981. – 168 с.
17. Напайваемые твердосплавные пластины для режущего инструмента: Руководящие материалы. – Светловодск: Светкермет, 2002. – 20 с.
18. Приведенные справочные материалы по применению продукции АО «Московский комбинат твердых сплавов», представлены официальным представителем комбината на Беларуси предприятием «Реал» // Мир инструмента (Беларусь). – 1995. – № 2. – С. 16–17.
19. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с.
20. Точение износостойких покрытий / С.А. Клименко, Ю.А. Муковоз, Л.Г. Полонский, П.П. Мельничук. – К.: Техніка, 1997. – 142 с.
21. Лошак, М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов / М.Г. Лошак. – К.: Наукова думка, 1984. – 328 с.
22. Применение плазменных порошков вольфрама в производстве мелкозернистых твердых сплавов / В.А. Чистякова, М.С. Янговская, А.В. Федоров, В.В. Цветков / Качество и эффективность применения твердых сплавов: Сб. науч. тр. – М.: Металлургия, 1984. – С. 22–25.
23. Твердые сплавы с ультрамелкозернистой структурой для мелкогабаритного инструмента / Т.А. Емельянова, Е.И. Геллер, А.И. Аникеев, В.И. Жилис // Свойства и применение спеченных твердых сплавов: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИТС, 1991. – С. 116–122.
24. Иванов, С.А. Моделирование процесса интенсивного электроспекания композиционных алмазосодержащих материалов на связке из твердых сплавов WC – Co группы / С.А. Иванов, В.А. Дутка, А.Л. Майстренко // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия и сварка: Матер. докл. 6-й Межд. конф., Минск, 6–7 апреля 2004. – Минск: БГ НПК ПМ НАНБ, 2004. – С. 255–256.
25. Бакуль, В.Н. Оптимальные марки алмазов для кругов на органической связке / В.Н. Бакуль, В.М. Сердюк // Синтетические алмазы. – 1970. – Вып. 4. – С. 4–9.
26. Физико-механические и усталостные свойства твердых сплавов на основе карбида титана / Н.Н. Середа, М.С. Ковальченко, В.А. Цыбань, Л.Н. Белобородов // Порошковая металлургия. – 1985. – № 3. – С. 74–78.
27. Мойнова, Н.В. Износ безвольфрамовых твердых сплавов при различных условиях истирания / Н.В. Мойнова, В.Ф. Очкасов // Современные инструментальные материалы на основе тугоплавких соединений: Сб. научн. трудов. – М.: Металлургия, 1985. – С. 55–59.

28. Кабалдин, Ю.Г. Анализ разрушения тонких покрытий на твердом сплаве при прерывистом резании / Ю.Г. Кабалдин, С.А. Изотов // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 1. – С. 31–36.
29. Захаренко, И.П. Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента / И.П. Захаренко. – К.: Наукова думка, 1981. – 300 с.
30. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 3. «Резание материалов лезвийными инструментами». – Одесса: ОНПУ, 2003. – 546 с.
31. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 томах / Том 6: Алмазно-абразивный инструмент в технологиях механообработки / Под ред. А.О. Шепелева. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2007. – 340 с.

**Лавриненко Валерий Иванович**  
Институт сверхтвердых  
материалов им. В.Н. Бакуля НАН  
Украины, г. Киев  
Доктор технических наук,  
профессор, зав. отделом алмазно-  
абразивной и физико-технической  
обработки  
E-mail: lavrinenko@ism.kiev.ua

**Скрябин Валерий Алексеевич**  
Институт сверхтвердых  
материалов им. В.Н. Бакуля НАН  
Украины, г. Киев  
Зам. зав. отделом алмазно-  
абразивной и физико-технической  
обработки  
E-mail: lavrinenko@ism.kiev.ua

**Пасичный Олег Олегович**  
Институт сверхтвердых  
материалов им. В.Н. Бакуля НАН  
Украины, г. Киев  
Кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Старший научный сотрудник  
отдела алмазно-абразивной и  
физико-технической обработки  
E-mail: ceramic@ism.kiev.ua

**Солод Владимир Юрьевич**  
Днепродзержинский  
государственный технический  
университет, г. Днепродзержинск  
Кандидат технических наук,  
доцент, декан механического  
факультета  
E-mail: v\_solod@ukr.net

**Сытник Алексей Алексеевич**  
Научно-производственная фирма  
«Карма», г. Светловодск  
кандидат технических наук,  
директор  
E-mail: Alekssytnik@meta.ua

---

V.I. LAVRINENKO, V.A. SKRYABIN, O.O. PASICHNYY, V.YU. SOLOD, A.A. SYTNIK

## **INFLUENCE OF PROPERTIES OF HARD ALLOYS ON THEIR WORKABILITY DIAMOND CIRCLES**

*Researched the impact of instrumental properties of hard alloys for their machinability in the process of machining processing by diamond grinding tool. Information about the specific values of the properties of the most typical brands of hard alloys are given. Shown what the main properties that determine the machinability of sintered hard alloys, are density, hardness, tensile strength in bending, the coercive force, and characteristics such as porosity and grain size of the carbide phase.*

**Keywords:** *hard alloys, diamond machining, grinding wheels, machinability, property, hardness, tensile strength in bending, the coercive force.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Lavrinenko, V.I. Nadtverdi abrazivni materialy v mekhanooobrobsi: Yentsiklopedichniy dovidnik / V.I. Lavrinenko, M.V. Novikov / Pid zag. red. akad. M.V. Novikova. – Kif v: INM im. V.M. Bakulya NAN Ukrafi ni, 2013– 456 s.
2. Loshak, M.G. Kriterii dolgovechnosti tverdosplavnykh elementov apparatov vysokogo davleniya dlya sinteza sverkhkhtverdykh materialov / M.G. Loshak // Sverkhkhtverdyye materialy. – 2002. – № 4. – S. 61–70.
3. Vinogradov, V.N. Abrazivnoye iznashivaniye / V.N. Vinogradov, G.M. Sorokin, M.G. Kolokolnikov. – M.: Mashinostroeniye, 1990. – 224 s.
4. Litoshenko, N.V. Zakonomirnosti vplivu zalishkovikh termichnikh mikronapruzhen ta dispersii rozniriv karbidnikh zeren na deformatsiyni kharakteristiki tverdikh splaviv WC-Co: Avtoref. ... kand. tekhn. nauk. – K.: ISM NAN Ukrafi ni, 2002. – 23 s.
5. Rentgenograficheskoye issledovaniye termoobrobotannykh tverdyykh splavov WC – Co / L.I. Aleksandrova, M.G. Loshak, T.B. Gorbacheva, A.V. Varaksina // Poroshkovaya metallurgiya. – 1986. – № 5. – S. 93–98.
6. Rabotyagin, YU.D. Sovremennyye instrumentalnyye materialy i rezhushchiy instrument dlya effektivnoy obrabotki / YU.D. Rabotyagin // ITO: instrument, tekhnologiya, oborudovaniye. – 2000. – № 2. – S. 86–88.
7. Tabakov, V.P. Razrabotka mnogoslownykh pokrytiy dlya usloviy preryvistogo rezaniya / V.P. Tabakov, M.YU. Smirnov, A.V. Tsirkin // Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh. – 2005. – Vyp. 69. – S. 301–310.
8. Kryukov, V.K. Rol kontaktnoy sredy v povyshenii rabotosposobnosti pretsizionnogo instrumenta / V.K. Kryukov, N.V. Kryuksev // Rezaniye i instrument. – 1998. – Vyp. 47. – S. 130–131.
9. Popke, G. Rezervy ratsionalizatsii pri nanesenii pokrytiy na instrument / G. Popke, L. Dyubner, T. Emmer // Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh. – 1996. – Vyp. 50. – S. 142–149.



10. GOST 3882–74 «Splavy tverdye spechennyye. Marki».
11. Lisovskiy, A.F. Formirovaniye gradiyentnoy struktury v spechennykh tverdykh splavakh (Obzor) / A.F. Lisovskiy // Sverkhтвердые материалы. – 2010. – № 4. – С. 36–53.
12. Modelyuvannya termomekhanichnogo stanu yelementiv aparata visokogo tisku dlya sintezu almaziv z rozvinutoyu poverkhneyu / M.V. Novikov, O.I. Borimskiy, O.O. Leshchuk ta in. // Sverkhтвердые материалы. – 2004. – № 4. – С. 3–15.
13. Issledovaniya i opyt vnedreniya skorostnogo rezaniya metallov mineralokeramicheskimi instrumentami. – Gorkiy, 1957. – 87 s.
14. Teploprovodnost i iznos tverdospavnykh rezhushchikh elementov posle termicheskoy obrabotki / M.Ye. Dudkin, M.G. Loshak, T.D. Ositinskaya, V.V. Miklushis // Sverkhтвердые материалы. – 1981. – № 2. – С. 35–38.
15. Lavrinenko, V.I. Elektroshlifovaniye instrumentalnykh materialov. – K.: Naukova dumka, 1993. – 152 s.
16. Mukha, I.M. Tverdye splavy v melkoseriynom proizvodstve / I.M. Mukha. – K.: Naukova dumka, 1981 – 168 s.
17. Napaivayemye tverdospavnyye plastiny dlya rezhushchego instrumenta: Rukovodyashchiye материалы. – Svetlovodsk: Svetkermet, 2002. – 20 s.
18. Privedennyye spravochnyye материалы po primeneniyu produktsii AO «Moskovskiy kombinat tverdykh splavov», predstavleny ofitsialnym predstavitelem kombinata na Belarusi predpriyatiyem «Real» // Mir instrumenta (Belarus). – 1995. – № 2. – С. 16–17.
19. Instrumenty iz sverkhтвердых материалов / Pod red. N.V. Novikova. – Kiyev: ISM NANU, 2001. – 528 s.
20. Tocheniye iznosostoykikh pokrytiy / S.A. Klimenko, YU.A. Mukovoz, L.G. Polonskiy, P.P. Melnichuk. – K.: Tekhnika, 1997. – 142 s.
21. Loshak, M.G. Prochnost i dolgovechnost tverdykh splavov / M.G. Loshak. – K.: Naukova dumka, 1984. – 328 s.
22. Primneniye plazmennyykh poroshkov volframa v proizvodstve melkozernistykh tverdykh splavov / V.A. Chistyakova, M.S. Yantovskaya, A.V. Fedorov, V.V. Tsvetkov / Kachestvo i effektivnost primneniya tverdykh splavov: Sb. nauch. tr. – M.: Metallurgiya, 1984. – С. 22–25.
23. Tverdye splavy s ultramelkozernistoy strukturoy dlya melkorazmernogo instrumenta / T.A. Yemelyanova, Ye.I. Geller, A.I. Anikayev, V.I. Zhilis // Svoystva i primneniye spechennykh tverdykh splavov: Sb. nauch. tr. – M.: VNIITS, 1991. – С. 116–122.
24. Ivanov, S.A. Modelirovaniye protsessa intensivnogo elektrospekaniya kompozitsionnykh almozoderzhashchikh materialov na svyazke iz tverdykh splavov WC – Co gruppy / S.A. Ivanov, V.A. Dutka, A.L. Maystrenko // Novyye материалы i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnyye материалы, zashchitnyye pokrytiya i svarka: Mater. dokl. 6–y Mezhd. konf., Minsk, 6–7 aprelya 2004. – Minsk: BG NPK PM NANB, 2004. – С. 255–256.
25. Bakul, V.N. Optimalnyye marki almozov dlya krugov na organicheskoy svyazke / V.N. Bakul, V.M. Serdyuk // Sinteticheskiye almazy. – 1970. – Vyp. 4. – С. 4–9.
26. Fiziko–mekhanicheskiye i ustalostnyye svoystva tverdykh splavov na osnove karbida titana / N.N. Cereda, M.S. Kovalchenko, V.A. Tsyban, L.N. Beloborodov // Poroshkovaya metallurgiya. – 1985. – № 3. – С. 74–78.
27. Moynova, N.V. Iznos bezvolframovykh tverdykh splavov pri razlichnykh usloviyakh istiraniya / N.V. Moynova, V.F. Ochkasov // Sovremennyye instrumentalnyye материалы na osnove tugoplavkikh soyedineniy: Sb. nauchn. trudov. – M.: Metallurgiya, 1985. – С. 55–59.
28. Kabaldin, YU.G. Analiz razrusheniya tonkikh pokrytiy na tverdom splave pri preryvistom rezanii / YU.G. Kabaldin, S.A. Izotov // Sverkhтвердые материалы. – 1987. – № 1. – С. 31–36.
29. Zakharenko, I.P. Osnovy almoznoy obrabotki tverdospavnogo instrumenta / I.P. Zakharenko. – K.: Naukova dumka, 1981. – 300 s.
30. Fiziko–matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya / Pod obshchey redaktsiyei F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V desyati tomakh. – T. 3. «Rezaniye materialov lezviynymi instrumentami». – Odessa: ONPU, 2003. – 546 s.
31. Sverkhтвердые материалы. Polucheniye i primneniye. Monografiya v 6 tomakh / Tom 6: Almozno–abrazivnyy instrument v tekhnologiyakh mekhanoo-brabotki / Pod red. A.O. Shepeleva. – K.: ISM im. V.N. Bakulya, IPTS «ALKON» NANU, 2007. – 340 s.

**Lavrinenko Valerii Ivanovich**  
V. Bakul Institute for Superhard  
Materials, Kiev  
Doctor of technical Sciences,  
Professor, head of Department of the  
diamond abrasive and physico–  
technical processing  
E-mail: lavrinenko@ism.kiev.ua

**Skryabin Valerii Alekseevich**  
V. Bakul Institute for Superhard  
Materials, Kiev  
Assistant head of Department of the  
diamond abrasive and physico–  
technical processing  
E-mail: lavrinenko@ism.kiev.ua

**Pasichniy Oleg Olegovich**  
V. Bakul Institute for Superhard  
Materials, Kiev  
Ph.D., senior researcher of  
Department of the diamond abrasive  
and physico–technical processing  
E-mail: ceramic@ism.kiev.ua

**Solod Volodymir Yurievich**  
Dniprodzerzhinsk State Technical  
University  
Ph.D., Professor, Dean of mechanical  
faculty  
E-mail: v\_solod@ukr.net

**Sytnyk Alexiy Alekseevich**  
Scientific–production company  
«Karma», Svetlovodsk  
Ph.D., Director  
E-mail: Alekssytnik@meta.ua

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКОЙ

*Рассмотрен механизм формирования поверхностного слоя деталей комбинированным воздействием давления металлическими шариками с одновременным избирательным анодным удалением выступов и впадин микронеровностей. Показано, что новые комбинированные технологические процессы позволяют существенно улучшить эксплуатационные показатели силовых элементов конструкций летательных аппаратов, и востребованы разработчиками новых поколений техники.*

**Ключевые слова:** поверхностный слой, эксплуатационные характеристики, наложение электрического поля, летательные аппараты.

ППД широко применяется в машиностроении для повышения эксплуатационных свойств деталей машин и механизмов [1, 2]. При виброударном упрочнении [3] наложение электрического поля существенно изменяет геометрию вершин и впадин микронеровностей, снижает их величину и скругляет профиль. Это может значительно улучшить эксплуатационные показатели упрочненных деталей, особенно усталостную прочность материалов, работающих при знакопеременных многоцикловых нагружениях, имеющих место при эксплуатации летательных аппаратов. Совмещение в едином технологическом процессе механического, теплового и химического воздействия позволяет проектировать комбинированные методы обработки. К ним относятся новые методы упрочнения металлическими шариками, защищенные патентами [4, 5].

Моделирование процесса формирования микронеровностей, сложность взаимодействия шариков (гранул) с обрабатываемой поверхностью при комбинированной обработке электрохимическим методом с наклепом определяет упрощенную теоретико-вероятностную модель процесса контактирования, в том числе в среде электролита. Формирование микрорельефа поверхности деталей при их отделочно-упрочняющей комбинированной обработке (рисунок 1) осуществляется за счет пластического деформирования гранулами рабочей среды вершин микронеровностей (их осадки, выглаживания, усталостного выкрашивания) и незначительного анодного удаления материала с вершин микронеровностей. Но и здесь превалирующим является процесс осадки микронеровностей, в результате которого осуществляется распределение материала в поверхностном слое детали и, соответственно, уменьшение высотных параметров шероховатости. На обработанной плоской поверхности при равно распределенном образовании на ней взаимно перекрывающихся пластических отпечатков с коэффициентом перекрытия  $K_{пер}=3$  сплошность обработки составляет до 95% (рисунок 1).

Эксперименты показали, что диаметр отпечатков (рисунок 1) составляет:

$$d_o = \frac{d_{max}}{\sqrt{3}} \approx 0,057 \quad (1)$$

Учитывая, что измерения шероховатости обрабатываемой поверхности пропорциональны сплошности ее покрытия пластическими отпечатками.

$$0,95R_{z,max} = 0,5\sqrt{d_r^2 - d_o^2} - 0,5d_r + b_{max} \quad (2)$$

Здесь обозначения приведены на рисунке 1.

По [1] величину  $d_{max}$  можно описать экспериментальной зависимостью:

$$d_{max} = K_o \frac{d_r}{3} \sqrt{\frac{\pi C_k P_{z,max}}{2K_{ny}\sigma_t}} \quad (3)$$

где численные значения приведены в [1]

$C_k$  – коэффициент, учитывающий форму и состояние контактирующих поверхностей;

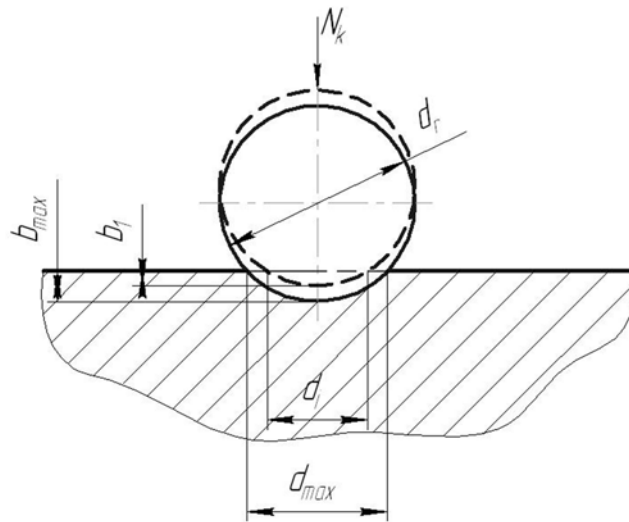
$K_{ny}$  – коэффициент поверхностной упаковки гранул;

$P_{z,max}$  – максимальная величина динамического давления рабочей среды в контактной зоне, МПа;

$\sigma_t$  – предел текучести материала детали, МПа;

$K_o$  – коэффициент, учитывает влияние анодного растворения неровностей,

$K_o = 0,6-0,9$ .



**Рисунок 1 – Формирование микрорельефа поверхности:**

$d_g$  – диаметр гранул,  $d_i$  – диаметр пластического отпечатка при минимально допустимой энергии удара,  $d_{max}$  – наибольший диаметр отпечатка,  $b_i$  – минимальная глубина единичного отпечатка,  $b_{max}$  – предельная глубина отпечатка,  $P$  – сила динамического воздействия шариков

С учетом (3) и (1) выражение (2) примет запись

$$\Delta R_{z \max} = 0,526 d_r \sqrt{1 - 0,058 C_k \frac{P_{3 \max}}{\sigma_t K_{ny}}} - \sqrt{1 - 0,074 C_k \frac{P_{3 \max}}{\sigma_t K_{ny}}} \quad (4)$$

Анализ (4) показывает, что показатель шероховатости – величина  $\Delta R_{z \max}$  существенно зависит от диаметра гранул рабочей среды, соотношения  $\frac{P_{3 \max}}{\sigma_t}$ , доли и воздействия электрического поля,  $C_k$  и  $K_{ny}$ , следовательно:

$$\frac{\Delta R_{z \max}}{\sigma_t} = f\left(\frac{P_{3 \max}}{\sigma_t}; C_k\right)$$

Анализ зависимости позволяет представить выражение (4) в виде:

$$\Delta R_{z \max} = 30634 K_{aop} C_k \frac{P_{3 \max}}{\sigma_t}, \text{ мкм} \quad (5)$$

где  $K_{aop}$  – коэффициент, учитывающий влияние анодного растворения и компонента ( $K_{aop} = 0,7-0,9$ ).

В любой момент обработки  $R_z = R_{z \text{исх}} - \Delta R_z$ , а  $\Delta R_z = C_{Rz} \cdot \Delta R_{z \max}$ ,

где  $C_{Rz}$  – соотношение достигнутого и максимально достижимого изменения параметра  $R_z \cdot (C_{Rz} = 0,8-1,0)$ .

$C_{Rz}$  в зависимости от текущего времени обработки и времени полного упрочнения  $\tau_{упр}$  можно [1] выразить функцией  $C_{Rz} = 1 - e^{-\frac{6\tau}{\tau_{упр}}}$

С учетом этого, выражение (5) будет представлено в форме:

$$\Delta R_z = 30,634 d_r K_{aop} C_k \frac{P_{3 \max}}{\sigma_t K_{ny}} \left(1 - e^{-\frac{6\tau}{\tau_{упр}}}\right) \quad (6)$$

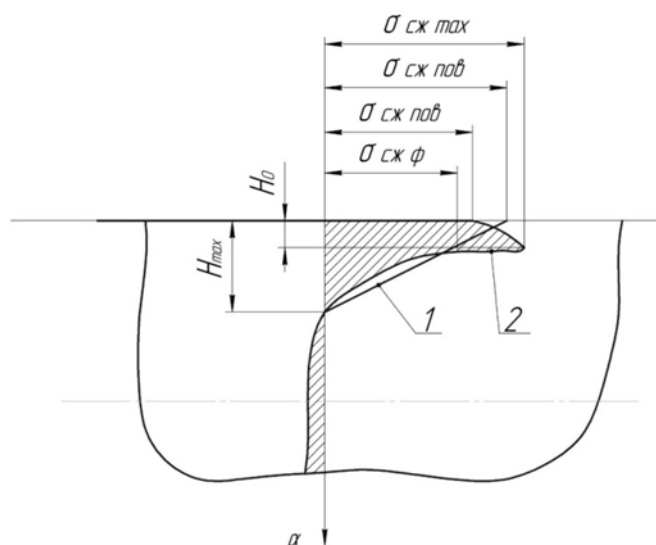
Выражение (6) позволяет с достаточной точностью прогнозировать значения параметров шероховатости применительно к конкретным материалам и конструктивным элементам.

Анализ остаточных напряжений в работе [3] показали экспериментально полученные эпюры распределения остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненного слоя

деталей и образцов из исследуемых материалов после различных способов, в том числе при комбинированной упрочняющей обработке. Анализ этих эпюр позволяет осуществить приближенное определение остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое упрочненных плоских образцов, для чего можно использовать упрощенную расчетную схему, в которой участвуют два вида эпюр распределения величины  $\sigma_{сж}$ , приведенных на рисунке 2. На рисунке 2 приведены эпюры, характеризующие процессы:

1. Идеализированный линейный;
2. Приближенный к реальному.

При этом площади эпюр и координаты их центров тяжести одинаковы. Эпюра 1 имеет максимум на поверхности образца  $\sigma'_{сжпов.}$ , а эпюра 2 характеризуется наличием подслоного максимума  $\sigma_{сж max}$  и напряжением в поверхностном слое образца  $\sigma_{сжпов.}$ . В первом приближении можно считать, что  $\sigma_{сж max} \approx \sigma'_{сжпов.}$ ,  $\sigma_{сжпов.} \approx \sigma_{сжср}$ , при этом  $\sigma'_{сжпов.} \approx 1,5\sigma_{сжср}$ .



**Рисунок 2 – Эпюры распределения остаточных напряжений сжатия в упрочненной поверхности плоского образца:**

$\sigma_{сж}$  – максимальное значение сжатия на поверхности образца ( $max$  – наибольший;  $пов$  – в поверхностном слое;  $\phi$  – среднее значение),  $H_{max}$  – глубина залегания максимальных остаточных напряжений,  $H_0$  – средняя глубина залегания остаточных напряжений одного знака

Величину остаточных напряжения сжатия оценивают по прогибу плоских образцов, подвергнутых односторонней упрочняющей обработке. Прогиб образцов является обобщенным показателем поверхностного упрочнения, который позволяет определять оптимальные режимы и условия упрочняющей обработки, оценивает долю воздействия анодного растворения, но не характеризует изменение напряженно-деформированного состояния упрочненного поверхностного слоя образцов и деталей. Это не дает точной количественной оценки таких показателей качества, как величина остаточных напряжений сжатия и глубина их распределения. Точное измерение этих величин требуют применения малопроизводительного способа послойного стравливания упрочненной поверхности образца, либо рентгеноструктурного метода, имеющего низкую точность. В случае сложноконтурной упрочненной поверхности и для литых деталей способы безконтактных измерений не используются.

Причиной деформации упрочненного с одной стороны плоского образца является наличие в его упрочненной поверхности остаточных напряжений сжатия  $\sigma_{сж}$  и, как следствие, появление создаваемого ими равномерно распределенного по этой поверхности изгибающего момента  $M_\sigma$ , величину которого относительно среднего поперечного сечения образца  $H_{cp}$ , можно представить в виде:

$$M_\sigma = \sigma_{сжср} \epsilon_{об} H_o (0,5 H_o - 0,333 H_{cp}) \quad (8)$$

где  $H_o$  и  $\epsilon_o$  – толщина и ширина образца, соответственно.

С учетом (7):

$$M_{\sigma} = 0,667 \sigma_{сж\ max} \epsilon_{об} H_o (0,5 H_o - 0,333 H_{max}) \quad (9)$$

Прогиб образца  $Z_{об}$  можно оценить по зависимости:

$$Z_{об} = \frac{M \sigma L_{об}^2}{8 E_{об} J_{хоб}} = \frac{3 M \sigma L_{об}^2}{2 E_{об} \epsilon_{об} a_{об}^3} \quad (10)$$

где  $L_{об}$  – длина образца;

$E_{об}$  – модуль упругости материала образца;

$J_{хоб}$  – осевой момент инерции поперечного сечения образца.

Из (9) и (10) следует:

$$\sigma_{сж\ пов} = \frac{2 E_{об} H_o^3 Z_{об}}{L_{об}^2 H_{max} H_o - K_{об} H_{max}} \quad (11)$$

где  $K_{об}$  – коэффициент,  $K_{об} = 0,667$ .

Для величины  $\sigma_{сж}$  для детали, изготовленной из другого материала, имеющие другие механические свойства, форму и шероховатость поверхности, после введения поправочных коэффициентов формула (11) принимает вид:

$$\sigma_{сж\ max} = \frac{2 E_{об} H_o^3 Z_{об} K_E K_Z}{L_{об}^2 K_a H_{max} (H_o - K_{об} K_a H_{max})} \quad (12)$$

где  $K_e$  – коэффициент, равный отношению модулей упругости материалов детали и образца;

$K_z$  – коэффициент равный отношению прогибов образцов, изготовленных из материала детали и контрольного материала;

$K_a$  – коэффициент, учитывающий отличие геометрической формы, шероховатости и механических свойств упрочняемого и контрольного материала. Численные значения коэффициентов различных условий приведены в [3].

На рисунке 3 приведена зависимость изменения напряжений сжатия ( $\sigma_{сж}$ ) и прогиба образца ( $Z_{об}$ ) от глубины залегания ( $H_{max}$ ). По зависимости на рисунке 3 для определения величины  $\sigma_{сж\ max}$  и  $\sigma_{сж\ пов}$  в поверхностном слое детали по прогибу типового плоского образца из закаленной стали У8А ( $E_{об} = 2,1 \cdot 10^5$  МПа,  $H_o = 1,2$  мм,  $\epsilon_{об} = 20$  мм,  $L_{об} = 70$  мм) получены экспериментальные формулы:

$$\sigma_{сж\ max} = \frac{123,4 Z_{об} K_E K_Z}{H_{max} (1 - 0,555 H_{max})}, \text{ МПа} \quad (13)$$

$$\sigma_{сж\ пов} = \frac{82,3 Z_{об} K_E K_Z}{H_{max} (1 - 0,555 H_{max})}, \text{ МПа} \quad (14)$$

Полученные теоретические исследования и их приложения для конкретных материалов, упрочняемые комбинированными методами, позволили создать ряд новых способов упрочнения поверхностного слоя. По патенту [2] упрочнение выполняется за счет разряда, имеющего энергию, аналогичную удару шара, приведенного на рисунке 1. Это дает возможность рассчитать режимы обработки (емкость конденсаторов). Особенностью рассматриваемого способа является то, что он выполняется в среде жидкой уголекислоты вольфрамовым электродом. Тепловое и механическое импульсное воздействие при таком способе позволяет достичь нового технического результата: наряду с упрочнением поверхностного слоя устранить дефекты в форме микротрещин, выходящих на поверхность упрочняемого материала. Схема процесса приведена на рисунке 4.

Процесс на рисунке 4 осуществляют в следующей последовательности: Заготовку 1 устанавливают в зону обработки и поворачивают так, чтобы место упрочнения имело положение, близкое к вертикальному. К участку упрочнения снизу, например, через форсунку 2, подают струю воздуха 3 совместно с жидкой уголекислотой 4, которая на выходе их форсунки 2 образует с воздухом аэрозоль 5, покрывающий пленкой 6 участок упрочнения на заготовке. Площадь струи в месте упрочнения детали подбирают так, чтобы она не перекрывала участок упрочнения. К участку подводят вольфрамовый электрод–инструмент 7, связанный с форсункой, перемещают к детали до получения разрядов. В результате эрозии

электрода–инструмента, образуются частицы 8, охлаждаемые и удаляемые из зоны упрочнения потоком аэрозоля. Далее систему (электрод–инструмент и форсунка) перемещают вдоль упрочняемой поверхности заготовки, поддерживая при этом зазор между электродом–инструментом и заготовкой по наличию стабильных разрядов, устанавливаемых на слух или по прибору контроля силы тока. Жидкая углекислота испаряется без образования кипящего слоя и зона обработки наблюдается визуально, что позволяет путем регулирования давления струи обеспечить наличие углекислоты и устранить налипание частиц на упрочняемую поверхность.

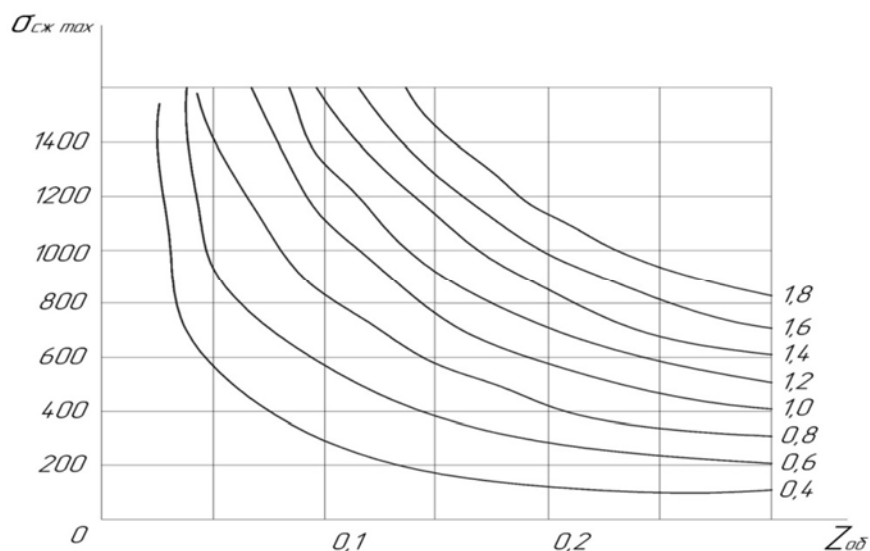


Рисунок 3 – Зависимость  $\sigma_{сж\max} = f(H_{\max}, Z_{об})$  при  $K_e = 1$  и  $K_z = 1$  для типовых плоских образцов из стали У8А при различном  $Z_{об}$ .

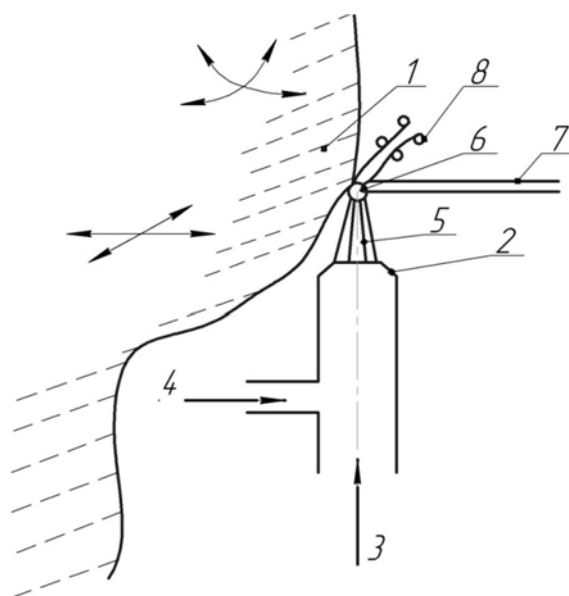


Рисунок 4 – Схема электроэрозионного упрочнения поверхностного слоя металлической детали

Давление воздуха и жидкой углекислоты регулируют и поддерживают так, чтобы частицы не задерживались в зоне обработки в пленке. Применение совместно с воздухом в качестве жидкого газа углекислоты с высокой температурой газообразования снижает расход жидкого газа за счет испарения, а сочетание на участке упрочнения углекислоты и микрочастиц вольфрама создает условия локального упрочнения поверхностного слоя карбидами вольфрама, образующегося микротрещинах.

Разработанный способ применен для стальных дисковых фрез. Подача жидкой углекислоты осуществлялась из баллона через форсунку с подачей воздуха от заводской сети с давлением 0,55–0,6 МПа. Рабочее давление углекислоты повышали до устранения на

поверхности заготовки оседающих частиц. Оно составляло 0,7–0,8 МПа. В качестве электрода–инструмента использовали вольфрамовый стержень диаметром 1 мм. На участке упрочнения было визуально видно движение микрочастиц, выносимых из зоны обработки аэрозолем, состоящей из смеси жидкой углекислоты и газов.

Для упрочнения использовался режим: напряжение на электроде 7 (рисунок 4) и заготовке 80В, емкость конденсатора 0,1 мкФ, скорость подачи электрода – 3–4 м/мин. Расход жидкой углекислоты составил около 0,05 м<sup>3</sup>/мин. Осмотр зоны упрочнения при увеличении 500 не выявил на упрочняемой поверхности твердых частиц с содержанием вольфрама. Наличие упрочнения подтверждено испытанием фрез из сплава P55K при прорезании пазов с шириной 1,2 мм в сплаве ЭП666. Стойкость упрочненных фрез возросла в 2,3 раза по сравнению с обработкой пазов фрезами без упрочнения, что указывает на равномерность распределения остаточных напряжений в поверхностном слое и подтверждает полученные расчетные характеристики. Шероховатость упрочняемой поверхности инструмента составляла  $R_{zmax} = 4\text{--}5$  мкм, что практически совпадает с аналогичным показателем для комбинированной обработки металлическими гранулами и что было выбрано за базу для оценки предложенного способа.

В процессе испытания способа по патенту [4] был установлен новый ранее не известный эффект «заращивания» при таком упрочнении имеющихся микротрещин, оставшихся после предшествующей обработки. Металлографические исследования показали, что механизм упрочнения включает действие разрядов в среде жидкого газа, когда происходит резкое его испарение, термоудар. Газ попадает в микротрещины, где он реагирует с плазмой из материала электрода. Здесь образуются карбиды, которые диффундируют в стенки микротрещины. После резкого остывания карбид сжимается стенками микротрещины и образует прочное монолитное соединение, чем объясняется повышенная стойкость упрочненного инструмента.

Предложенный способ упрочнения расширяет технологические возможности резания при обработке труднообрабатываемых сплавов, так как тонкие слои карбидов в микротрещинах обладают повышенной твердостью и защищены от растрескивания стенками микротрещины, а металл инструмента (обычно более мягкий) служит при резании смазкой, облегчающих обработку. В ряде случаев это позволяет применять для инструмента углеродистые стали вместо быстрорежа.

Способ по патенту [5] предназначен для повышения качества поверхностного слоя при комбинированной обработке узких пазов в турбинах насосных агрегатов ракетных двигателей. Схема осуществления способа приведена на рисунке 5. Способ позволяет повысить качество поверхностного слоя в каналах, значительная часть которых недоступна для металлорежущего инструмента. На рисунке 5 приведена последовательность применения способа, для чего на валу 4. устанавливают деталь 6, которая опирается на стол 5. На валу 4 внутри контейнера 1 закреплены твердосплавные вставки 7 с возможностью поворота вокруг оси 8. В верхнюю часть контейнера загружают рабочую среду 9 с твердым наполнителем через люк в крышке 2. В нижней части емкости 3 и в верхней части контейнера установлены штуцеры 10, соединенные с насосом 11. На стенке емкости ниже стола установлены расходомеры 12. При заполнении емкости до уровня расходомеров включается насос для перекачки рабочей среды в верхнюю часть контейнера. В качестве жидкой части рабочей среды могут использоваться токопроводящие растворы солей, что позволяет с их помощью переносить заряд к месту воздействия гранул наполнителя и до 20 % снизить высоту неровностей.

Для снижения высоты микронеровностей в проточной части колес турбин по способу [3] деталь устанавливают на стол так, чтобы широкая часть межлопастных каналов была направлена вверх, затем вставляют твердосплавные вставки, закрепленные на валу с возможностью поворота вокруг осей. Твердосплавные вставки устанавливают так, чтобы они образовали каналы одинакового сечения на протяжении всей длины межлопастного канала, образованного поверхностью межлопастных каналов и наружной поверхностью твердосплавных вставок.

После чего устанавливают контейнер и через люк в крышке заполняют контейнер жидкой рабочей средой с твердым наполнителем. При работе вибратора твердосплавные вставки совершают колебательные движения вдоль оси детали, а вал вместе с деталью и твердосплавными вставками вращаются вокруг оси. Колебательные движения твердосплавных вставок не только способствуют прохождению рабочей среды с твердым наполнителем, но и способствуют разрыхлению, снижению комкования рабочей среды. Удобнее частоту колебаний назначать 50 Гц, а амплитуду – не более разницы между

размером проходного сечения упомянутых каналов и диаметром твердого наполнителя рабочей среды.

В процессе обработки поверхности межлопаточного канала шероховатость снижается, а проходное сечение возрастает, поэтому для поддержания постоянной скорости продавливания рабочей среды с твердым наполнителем амплитуду снижают. После снижения количества рабочей среды с твердым металлическим наполнителем в емкости до уровня установки расходомера включается насос для ее перекачки в контейнер. Процесс продолжается до полной обработки детали, после чего вибромашину отключают и осуществляют демонтаж установки.

На протяжении всего цикла обработки скорость продавливания рабочей среды с твердым наполнителем должна быть постоянной:

$$a\omega = \text{const},$$

где  $a$  – амплитуда колебания вставок;

$\omega$  – частота колебания  $\omega$  рабочей среды с твердым наполнителем.

Способ применяли при обработке закрытой крыльчатки трубонасосного агрегата (деталь типа приведенной на рисунке 5) из материала ЭП 666 диаметром 240 мм.

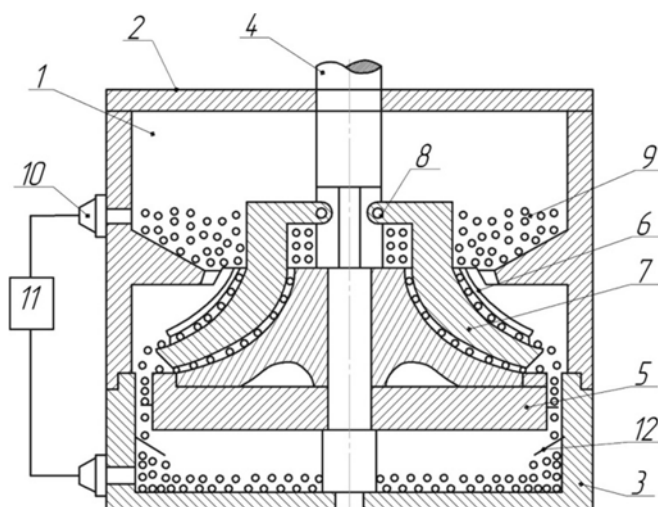


Рисунок 5 – Схема упрочнения межлопаточных каналов турбин

В контейнер загружали рабочую среду до высоты 120–150 мм над столом. В качестве жидкой фазы гранулированной рабочей среды применяли 5 % раствор  $\text{NaNO}_2$ , через который к месту обработки пропускали постоянный ток с напряжением 40В. При этом наполнитель являлся катодом. Размер проходного сечения в плоскости сечения на рисунке 5 для шаров диаметром 2,5 мм выбирали 5 мм, амплитуду колебаний в направлении оси детали – 1 мм, частоту вибратора – 50 Гц. Контейнер наполняли на 90 % объема полости смесью шаров диаметром 2,5 мм и каучуковой массы при соотношении объемов шаров и массы 1:3. По расходомеру индукционного типа контролировали скорость прохождения гранулированной рабочей среды через канал детали и за счет изменения амплитуды колебаний вала поддерживали постоянное произведение амплитуды и частоты колебаний гранулированной рабочей среды. Насос включают после 20 минут работы вибратора и далее ведут обработку в течение 20 минут, после чего отключают насос.

Измерение высоты неровностей в канале показало шероховатость 0,63 мкм, что отвечает требованиям, установленным для допустимой шероховатости проточного тракта лопаточных машин. Испытания изделий подтвердили высокое качество поверхностного слоя высоконагруженных деталей после обработки каналов комбинированным методом по способу [5].

В статье раскрыт механизм формирования поверхностного слоя при упрочнении гранулами с импульсным воздействием на них. Приведены преимущества и перспективы использования комбинированного процесса для повышения качества поверхностного слоя за счет анодного растворения вершин микронеровностей. Новые способы, реализованные в работе, позволили расширить область комбинированной обработки на чистовые операции при изготовлении межлопаточных каналов в крыльчатках и других лопаточных машинах, применяемых в аэрокосмической отрасли.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазуткин, А.Г. Механика нагружения поверхности волной деформации / А.Г. Лазуткин, А.В. Киричек, Ю.С. Степанов, Д.Л. Соловьев. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2005. – 149 с.
2. Пат. 2294824 Российская Федерация, МПК В24В 39/00. Наклепывающий инструмент с деформирующей пружиной / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Самойлов Н.Н. [и др.]; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет (ОрелГТУ) (RU). – № 2005131656/02; заявл. 12.10.2005; опубл. 10.03.2007, Бюл. № 7. – 4 с.
3. Сухочев, Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г.А. Сухочев. – Воронеж: Издательство ВГУ, 2003. – 287 с.
4. Пат. 2333823 Российская Федерация, МПК В23Н Кримогенно-эрозийный способ упрочнения поверхностного слоя / Смоленцев В.П., Сухочев А.Ю., Гренькова А.М.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет – № 20066141994; заявлен 27.11.2006; опубл. 20.09.2008, Бюл. №26. – 4 с.
5. Пат. 2269406 Российская Федерация, МПК В24В Способ вибрационной обработки / Смоленцев В.П., Некрасов А.Н., Бондарь А.В., Князев А.Н.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное унитарное предприятие «Воронежский механический завод» (RU). – № 2004113683; заявлен 05.05.2004; опубл. 10.02.2006, Бюл. №4. – 4 с.

**Смоленцев Владислав Павлович**  
ВГТУ  
Доктор технических наук,  
профессор, профессор кафедры ТМ  
ВГТУ  
394026 Воронеж, Московский пр.  
14, ВГТУ  
Тел.: 89036559970  
E-mail: vsmolen@inbox.ru

**Золотарев Владимир Викторович**  
Воронеж  
зам. главного инженера ВМЗ  
Тел.: 89036559970  
E-mail: vsmolen@inbox.ru

**Сухочев Геннадий Алексеевич**  
ВГТУ  
Доктор технических наук,  
профессор, профессор кафедры ТМ  
ВГТУ  
Адрес: 394026 Воронеж,  
Московский пр.14, ВГТУ  
Тел.: 89081417180  
E-mail: suhotchev@mail.ru

V.P. SMOLENTSEV, V.V. ZOLOTAREV, G.A. SUKHOCHEV

## FORMATION OF SURFACE LAYER RESULTS BY COMBINED TREATMENT

*Mechanism of surface layer formation of details by combined effect of pressure of metallic balls with simultaneous selective anodic removal of microroughnesses is viewed. Was demonstrated that new combined technological processes allow improving operating characteristics of primary structure elements of aircrafts and they are necessary for developers of new generates of equipment.*

**Keywords:** surface layer, operating characteristics, application of electric field, aircrafts.

## BIBLIOGRAPHY

1. Lazutkin, A.G. Mekhanika nagruzheniya poverkhnosti volnoy deformatsii / A.G. Lazutkin, A.V. Kirichek, YU.S. Stepanov, D.L. Solovyev. – M.: Izd-vo «Mashinostroyeniye-1», 2005. – 149 s.
2. Pat. 2294824 Rossiyskaya Federatsiya, MPK V24V 39/00. Naklepyvayushchiy instrument s deformiruyushchey pruzhinoy / Stepanov YU.S., Kirichek A.V., Samoylov N.N. [i dr.]; zayavitel i patentoobladatel Orlovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet (OrelGTU) (RU). – № 2005131656/02; zayavl. 12.10.2005; opubl. 10.03.2007, Byul. № 7. – 4 s.
3. Sukhochev, G.A. Upravleniye kachestvom izdeliy, rabotayushchikh v ekstremalnykh usloviyakh pri nestatsionarnykh vozddeystviyakh / G.A. Sukhochev. – Voronezh: Izdatelstvo VGU, 2003. – 287 s.
4. Pat. 2333823 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B23H Krimogenno-erozionnyy sposob uprochneniya poverkhnostnogo sloya / Smolentsev V.P., Sukhochev A.YU., Grenkova A.M.; zayavitel i patentoobladatel Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet – № 20066141994; zayavlen 27.11.2006; opubl. 20.09.2008, Byul. №26. – 4 s.
5. Pat. 2269406 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B24B Sposob vibratsionnoy obrabotki / Smolentsev V.P., Nekrasov A.N., Bondar A.V., Knyazev A.N.; zayavitel i patentoobladatel: Federalnoye gosudarstvennoye unitarnoye predpriyatiye «Voronezhskiy mekhanicheskii zavod» (RU). – № 2004113683; zayavlen 05.05.2004; opubl. 10.02.2006, Byul. №4. – 4 s.

**Smolentsev Vladislav Pavlovich**  
VSTU  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Department of TM VSTU  
394026 Voronezh, Moscow Avenue.  
14, VSTU  
Ph.: 89036559970  
E-mail: vsmolen@inbox.ru

**Zolotarev Vladimir Viktorovich**  
Voronezh  
Deputy. Chief Engineer VMZ  
Ph.: 89036559970  
E-mail: vsmolen@inbox.ru

**Suhochev Gennadiy Alekseevich**  
VSTU  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Department of TM VSTU  
Address: 394026 Voronezh, Moscow  
pr.14, VSTU  
Ph.: 89081417180  
E-mail: suhotchev@mail.ru

А.С. ЯМНИКОВ, О.А. ЯМНИКОВА, А.В. КИСЕЛЕВ

## ПОГРЕШНОСТЬ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПРИ КОНСОЛЬНОМ ЗАКРЕПЛЕНИИ ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ, ИМЕЮЩЕЙ ИСХОДНУЮ ОВАЛЬНОСТЬ

*Рассмотрено влияние количества зажимных элементов и расположения направления приложения сил закрепления центрирующих элементов приспособления относительно оси большого эллипса поперечного сечения заготовки на величину погрешности закрепления, обусловленной овальностью заготовки. Показано моделированием, что для круглых заготовок погрешность центрирования на стадии закрепления уменьшается с ростом числа зажимных элементов и не зависит от того, четное оно или нет.*

**Ключевые слова:** овальность, заготовка, приспособление, погрешность закрепления, точность.

В состав погрешности установки  $\Delta\epsilon_y$  входит погрешность закрепления  $\Delta\epsilon_z$ . Для тонкостенных трубных деталей  $\Delta\epsilon_z$  включает некоторые виды искажения формы, в том числе волнистость и некруглость поверхностей и, следовательно, изменение положения центра поперечного сечения [1, 2].

Процесс закрепления заготовок не только вызывает упругую деформацию, но и, при определенных значениях сил, сопровождается пластическим деформированием закрепляемой поверхности, т.е. ее наклепом, который может вызывать возникновение дефектов в поверхностном слое и последующее изменение формы на эксплуатационной стадии [3]. Все это требует глубокого исследования напряженно-деформированного состояния тонкостенных трубных заготовок и оценку воздействующих на них сил, с целью уменьшения возникновения брака до минимально возможного.

Этим вопросам посвящен ряд работ ученых [3–15]. В большинстве из них форма установочной поверхности заготовки до закрепления на станке принималась идеально круглой. В отдельных исследованиях [3, 4] учитывалась овальность и разностенность трубных заготовок, так в работе [3] рассматривались отличия в деформировании овальных и круглых колец при зажиме. Однако и здесь проблема была рассмотрена недостаточно полно.

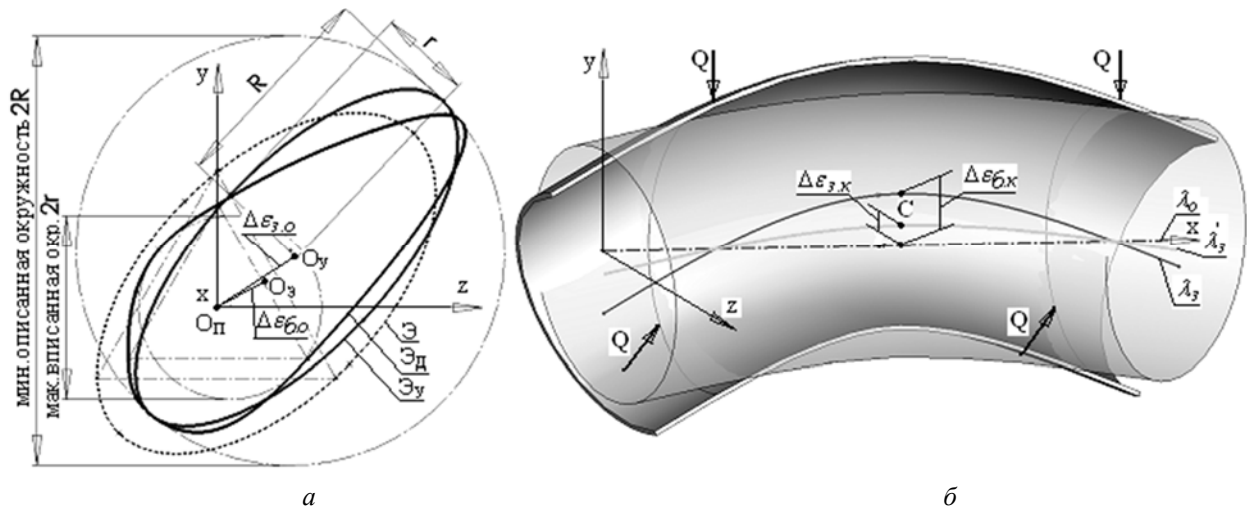
Известно, что при механической обработке трубной заготовки процесс установки разделяется на две главные стадии: базирование и закрепление.

Как показано выше, на стадии базирования возникают погрешности центрирования  $\Delta\epsilon_{\delta}$  и ее составляющие  $\Delta\epsilon_{\delta.o}$  и  $\Delta\epsilon_{\delta.k}$ . Стадия базирования заканчивается при фиксации заготовки, как минимум, в трех контактных точках и характеризуется отсутствием деформации. На стадии закрепления зажимные элементы перемещаются к оси приспособления  $\lambda_o$ , зажимают заготовку и заставляют ее деформироваться. Поэтому стадия закрепления характеризуется величиной деформации заготовки под действием сил зажимного устройства.

При закреплении под действием контактных сил, закрепляемая поверхность деформируется и ее первоначальный овальный вид (исходный овал) превращается в другой новый овал или сложную фигуру. В некоторых случаях полученная фигура не осесимметричная. Тогда для моделирования процесса исследования вместо полученной фигуры вводим понятие «условный эллипс» и его центр считаем условным центром сечения деформированной заготовки. Как показано на рисунке 1, а, условный центр фигуры «Э<sub>д</sub>» является центром ее условного эллипса «Э<sub>у</sub>».

Здесь условный эллипс «Э<sub>у</sub>» – это эллипс, у которого центр определяется по условию равновесия сечения, т.е. является центром тяжести, а большой и малый радиусы являются радиусами минимальной описанной и максимальной вписанной окружностей для фигуры

«Э<sub>д</sub>», соответственно. (Условимся называть условный центр сечения деформированной заготовки просто «центр»).



**Рисунок 1 – Условный эллипс и погрешности заготовки на стадии закрепления:**

$x-y-z$  – токарная система координат,  $O_p$  – центр ротационной части приспособления,  $O_3$  – центр исходного эллипса Э (поперечного сечения заготовки),  $Э_д$  – деформированный эллипс после закрепления,  $O_y$  – центр условного эллипса  $Э_y$ ;  $Δε_{6,0}$ ,  $Δε_{3,0}$  – погрешности центрирования, обусловленные овальностью  $e_0$ , на стадиях базирования и закрепления (а),  $Δε_{6,к}$ ,  $Δε_{3,к}$  – погрешности центрирования, обусловленные кривизной  $e_k$ , на стадиях базирования и закрепления (б)

Итак, на стадии закрепления имеем понятия:

- условная овальность  $e_3$  – это относительная овальность условного эллипса;
- погрешность  $Δε_{3,0}$  – это смещение центра сечения от ожидаемого положения при закреплении (центра ротационной части приспособления), называемое погрешностью центрирования, обусловленной овальностью заготовки;
- погрешность  $Δε_{3,к}$  – так же называется погрешностью центрирования при закреплении, обусловленной кривизной заготовкой (см. рисунок 1, а и 1, б). Рассмотрим заготовку (рисунок 2), закрепляемую под углом  $φ_m=0$  (то есть линия действия сил зажима совпадает с большей осью эллипса, имеющегося в поперечном сечении заготовки) в приспособлении с 6-ю зажимными элементами ( $k_N = 6$ ), так же как при  $k_N = 2$  и  $k_N = 4$ , погрешность центрирования в торцах А (закрепляемом) и В (обрабатываемом) отсутствует и их условные овальности считаются в зависимости от исходной овальности.

При наличии овальности (или отклонения от круглости) сечения заготовки возникает разница в зажимных силах в зависимости от величины овальности. Рассмотрим модель заготовки с размерами  $R = 100\text{мм}$ ,  $t = 2\text{мм}$ ,  $L = 50\text{мм}$ , на которую действуют ролики, перемещающиеся на одинаковое расстояние  $δ_{жс}=3\text{мм}$  в направлении радиуса к центру. Данные, полученные благодаря программе SolidWorks–COSMOS [16], обработаны и проверены в MatLab [17, 18]. На рисунке 3–5 представлены модель заготовки и изменения овальности  $δ_0$  и зажимных сил  $Q_i$  в зависимости от исходной овальности  $e_0$ .

При зажиме в трехкулачковом патроне ( $k_N=3$ ) картина меняется и появляется погрешность центрирования на стадии базирования  $Δε_{6,0}$  и на стадии закрепления  $Δε_{3,0}$  [5].

Как показано выше, после закрепления деформированное сечение заготовки превращается в другой овал или сложную фигуру. Оценка погрешности тогда зависит от того, как определить центр деформированного сечения. Как и ранее здесь введем определение: «центр деформированного сечения, который определяется по условию равновесия сечения, т.е. является центром тяжести, а большой и малый радиусы являются

радиусами минимальной описанной и максимальной вписанной окружностей для сечения» (рисунок 1).

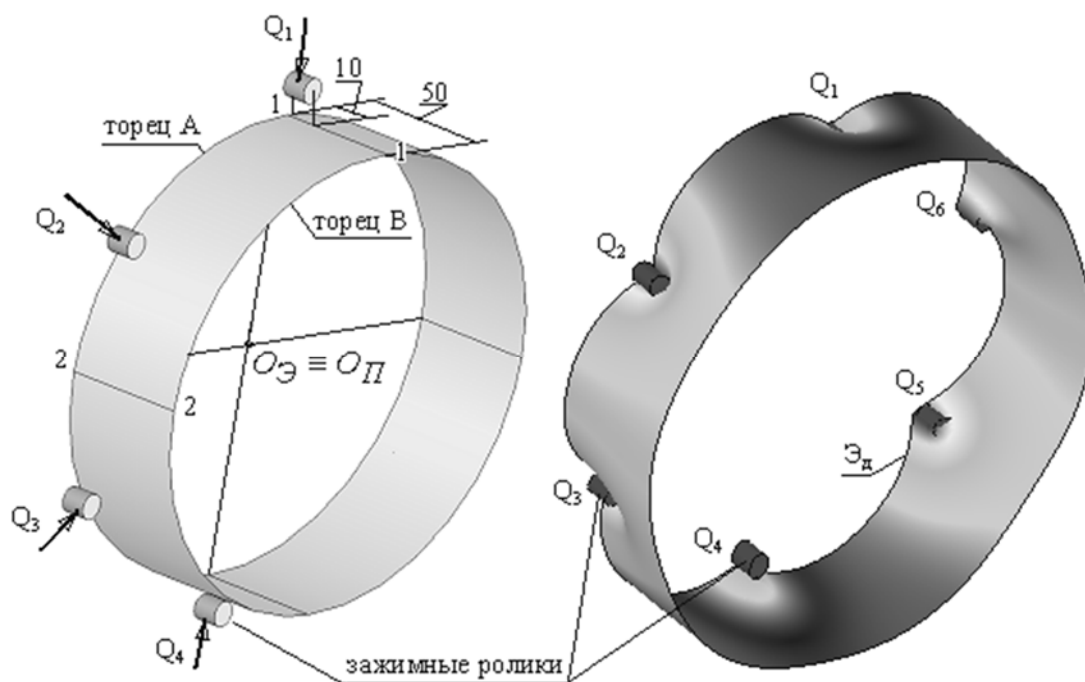


Рисунок 2 – Модель закрепления заготовки в приспособлении с 6-ю зажимными роликами:

Размеры заготовки  $R = 100$  мм,  $t = 2$  мм,  $L = 50$  мм.

Длины зоны приложения сил (длины роликов)  $l_p = 10$  мм с торца А

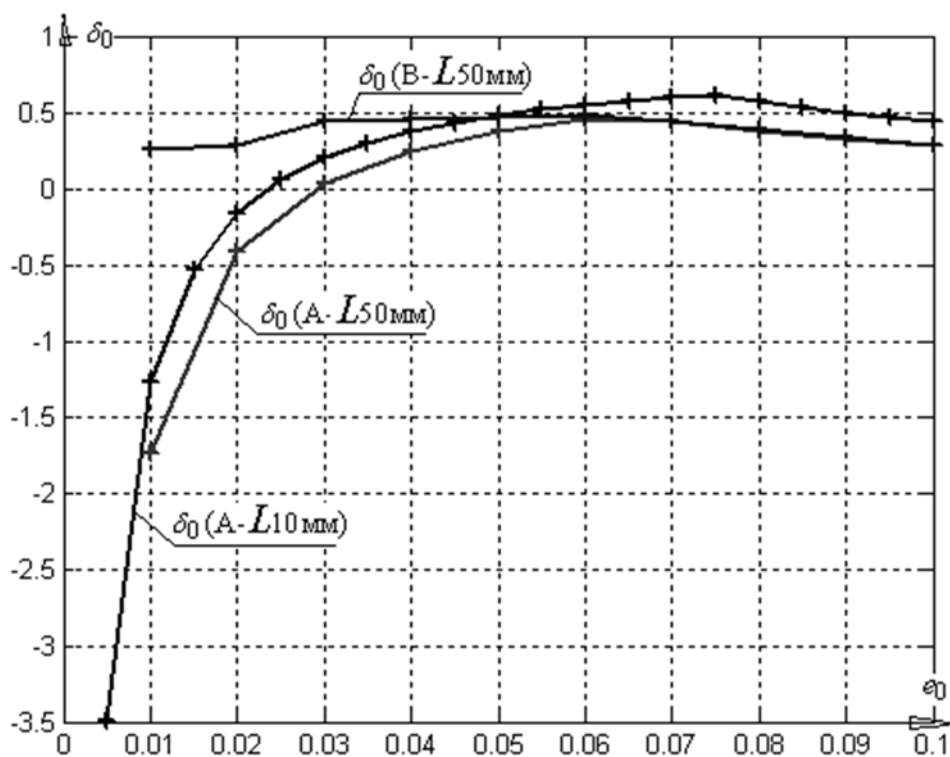


Рисунок 3 – Зависимости изменения овальности  $\delta_0$  от исходной овальности  $e_0$  в торцевых сечениях заготовки А и В при длине заготовки  $L=50$  мм и на длине роликовых зажимных элементов 10 мм

В ходе исследований доказано, что это определение хорошо отражает влияние овальности заготовки на погрешности детали. Согласно этому, обрабатывая данные

программой MatLab [13, 15], получили данные, которые показывают, что при  $\varphi = 30^\circ$  влияние зажимных сил на овальность и погрешность центрирования торцов заготовки ( $\delta_0$  и  $\delta_{ц.о}$ ) является наименьшим, однако их абсолютные значения ( $e_3$  и  $\Delta e_{3,0}$ ) при этом наибольшие.

Для модели, описанной выше, нагруженной действием зажимных элементов при их радиальном перемещении к центру на 3 мм, имеем конкретные параметры, сведенные в таблицу 1.

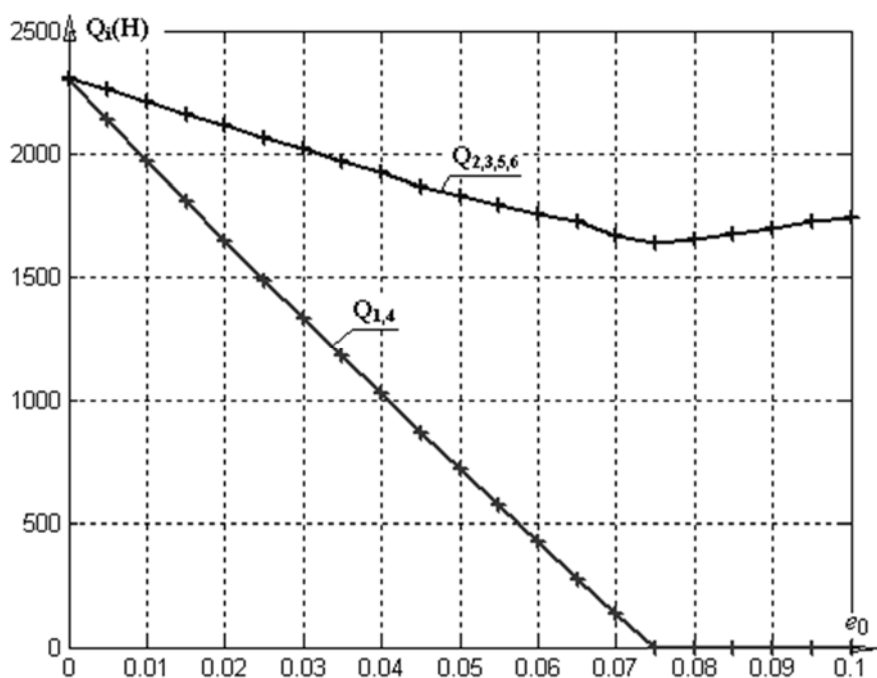


Рисунок 4 – Графики изменения сил закрепления  $Q_i$  в зависимости от овальности  $e_0$ : Силы  $Q_1$  и  $Q_4$  быстро уменьшаются до нуля при увеличении овальности  $e_0$  до 0,075

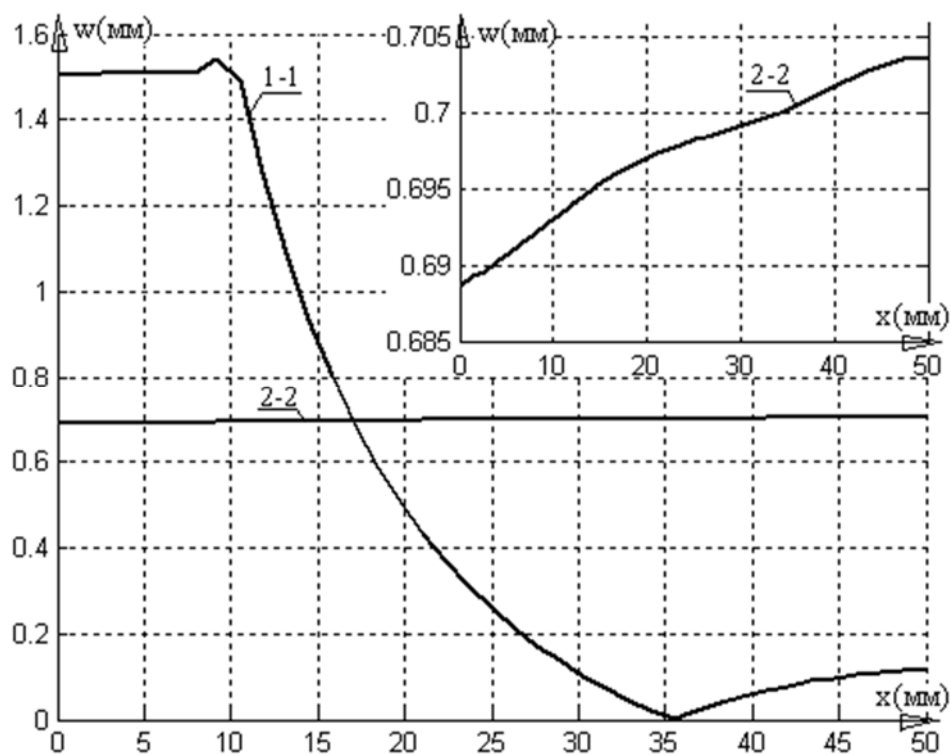


Рисунок 5 – Графики изменения деформации оболочки по длине на образующих 1-1 и 2-2 (рисунок 2)

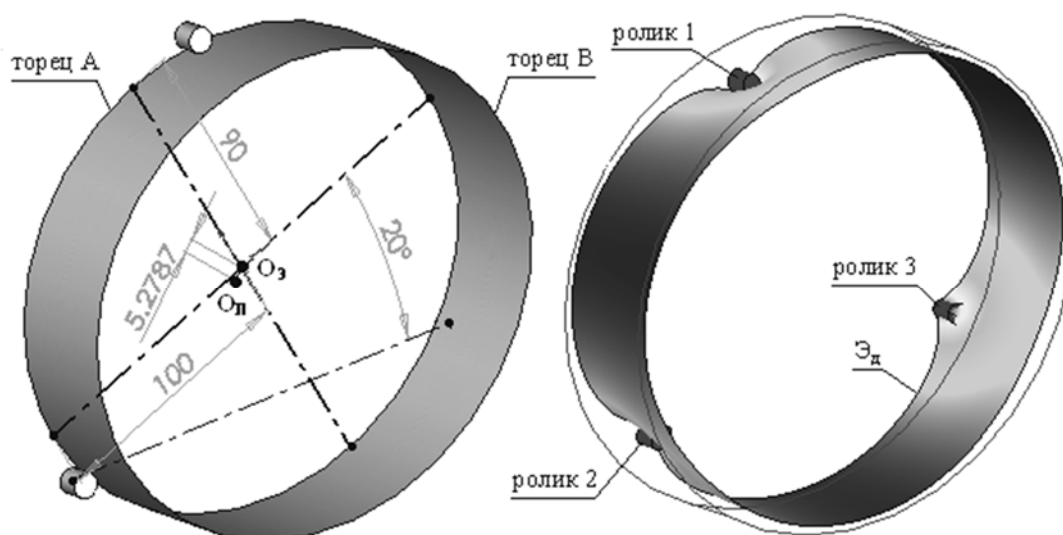


Рисунок 6 – Модель закрепления заготовки в приспособлении с тремя роликами

Таблица 1 – Параметры деформации зажимаемой оболочки при  $k_N=3$

$\varphi^\circ$	в торце А				в торце В			
	$\delta_0$	$e_z$	$\delta_{ц.о}$	$\Delta \varepsilon_{з.о}$ (мм)	$\delta_0$	$e_z$	$\delta_{ц.о}$	$\Delta \varepsilon_{з.о}$ (мм)
0	1,354	0,2354	0,0198	4,6061	1,008	0,2008	0,0082	4,5537
30	1,041	0,0147	0,0147	5,5909	0,968	0,1969	0,0044	5,5340

Данные моделирования показывают, что в случае закрепления заготовки под углом  $\varphi=0^\circ$  при росте исходной овальности  $e_0$  влияние зажимных сил на овальность уменьшается, а на погрешность центрирование увеличивается.

Таким образом, под действием зажимных сил заготовка либо деформируется и следует изменение овальности ( $\delta_0 = \frac{e_z - e_0}{e_0}$ ), либо смещается и следует изменение

погрешности центрирования ( $\delta_{ц.о} = \frac{\Delta \varepsilon_{з.о} - \Delta \varepsilon_{б.о}}{\Delta \varepsilon_{б.о}}$ ), или совершает и то и другое – тогда погрешности находятся в тенденции равновесия (если  $\delta_0$  уменьшается, то  $\delta_{ц.о}$  увеличивается и наоборот).

Для оценки целесообразности использования приспособлений с различным количеством кулачков  $k_N$  приведена таблица 2.

Таблица 2 – Параметры деформации зажимаемой оболочки при различном количестве зажимных элементов

$k_N$	$Q$ (Н)	$e_0$	$\Delta \varepsilon_{ц.о}$ (мм)	в торце А		в торце В	
				$e_z$	$\Delta \varepsilon_{з.о}$ (мм)	$e_z$	$\Delta \varepsilon_{з.о}$ (мм)
2	500	0,01	0	0,1681	0	0,1651	0
3	333,3333	0,01	0,4948	0,0521	0,4693	0,0379	0,4427
4	250	0,01	0	0,0222	0	0,0183	0
5	200	0,01	0,4962	0,0241	0,4966	0,0205	0,4980
6	166,6667	0,01	0	0,0243	0	0,0205	0
7	142,8571	0,01	0,3984	0,0213	0,3979	0,0200	0,3979
8	125	0,01	0	0,0199	0	0,0198	0
9	111,1111	0,01	0,3244	0,0204	0,3246	0,0199	0,3244

Заготовка здесь имеет те же параметры, приведенные выше, т.е.  $R=100$ мм,  $t=2$ мм,  $L=50$ мм,  $E=2 \cdot 10^5$ Н/мм<sup>2</sup>,  $\nu=0,3$ . Овальность принимаем в рассматриваемом случае  $e_0=0,01$ , т.е. меньший радиус поперечного сечения  $r=99$ мм.

Для того, чтобы обеспечить одинаковый крутящий момент на заготовку, суммарные зажимные силы приняты равными и  $\sum_i Q_i = 1$  кН.

Исследование технологических процессов с различными схемами установки тонкостенных трубных заготовок, в результате которых погрешности формы заготовки переносятся на погрешности центрирования при их закреплении позволяет сделать следующие выводы.

1. При закреплении происходит деформирование закрепляемой и обрабатываемой поверхностей, приводящее к изменению овальности и погрешности центрирования в соответствующих сечениях. Этот сложный процесс зависит не только от конструктивных параметров заготовки, но и от параметров материалов заготовки, нагрузки и схем закрепления.

2. Для круглых заготовок погрешность центрирования на стадии закрепления уменьшается с ростом числа зажимных элементов и не зависит от того, четное оно или нет.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямников, А.С. Анализ способов установки нежестких заготовок с существенными отклонениями от цилиндричности / А.С. Ямников, В.Н. Киселев, Нгуен Хыу Луен // Известия ТулГУ. Технология машиностроения. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2004. – Вып. 2. – С. 18–22.
2. Степанов, Ю.С. Точность контрольных приспособлений / Ю.С. Степанов, Б.И. Афанасьев, В.Б. Ильицкий. – М.: Машиностроение–1, 2003. – 160 с.
3. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.
4. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифовальных деталей П.И. Ящерицын. – Минск.: Наука и техника, 1971. – 210 с.
5. Ямников, А.С. Погрешность центрирования трубной заготовки с овальностью / А.С. Ямников, В.Н. Киселев, Нгуен Хыу Луен // Изв. ТулГУ. Машиноведение, системы приводов и детали машин. – ТулГУ, 2006. – С. 224–230.
6. Ямников, А.С. Геометрические параметры качества труб / А.С. Ямников, В.Н. Киселев, Нгуен Хыу Луен // Известия ТулГУ. Технология машиностроения. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 27–31.
7. Альбом контрольно-измерительных приспособлений: учебное пособие для вузов / Ю.С. Степанов, В.И. Афанасьев, А.Г. Схиртладзе, А.Е. Щукин, А.С. Ямников. – М.: Машиностроение, 1998. – 183 с.
8. Ямников, А.С. Взаимное влияние погрешностей формы и расположения сопрягаемых поверхностей на относительную площадь пятна контакта / А.С. Ямников, Н.А. Терехин, О.А. Ямникова // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 10 (171). – С. 40–43.
9. Ямников А.С. Эмпирические зависимости величины сближения контактирующих деталей при импульсной нагрузке / А.С. Ямников, О.А. Ямникова, О.С. Кашман // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 3. – С. 42–48.
10. Матвеев, И.А. Статистический анализ точности предварительной токарной обработки трубной заготовки / И.А. Матвеев, О.А. Ямникова, А.С. Ямников // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2015. – Вып. 11. – Ч. 1. – С. 111–120.
11. Быков, Г.Т. Динамическая модель виброустойчивости при точении тонкостенных труб многорезцовыми головками / Г.Т. Быков, О.А. Ямникова, Н.Б. Дорохин и А.С. Ямников А.С. // СТИН. – 2009. – № 12. – С. 17–21.
12. Ямникова, О.А. Определение условий виброустойчивого точения нежестких заготовок многорезцовыми головками / О.А. Ямникова, А.С. Ямников // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 11. – С. 15–21.
13. Ямникова, О.А. Комплексная оценка технологичности деталей типа тел вращения / О.А. Ямникова, Д.И. Троицкий, Ю.В. Балашева // СТИН. – 2008. – № 6. – С. 23–25.
14. Bykov, G.T. Vibrational stability in turning thin-walled pipe by multicutter heads / G.T. Bykov, O.A. Yamnikova, N.B. Dorokhin, A.S. Yamnikov. // Russian Engineering Research. – 2010. – 30 (3). – pp. 296 – 299.
15. Yamnikova, O.A. Evaluating The Design of Parts In The Form of Solids of Revolution / O.A. Yamnikova, D.I. Troitskii, Yu.V. Balasheva // Russian Engineering Research. – 2008. – Т. 28. – № 9. – pp. 910–912.
16. Planchard, D. Official Certified SolidWorks Professional (CSWP). Certification Guide with Video Instruction: SolidWorks 2012–2014 / David Planchard. – SDC Publications, 2014. – 192 p.
17. Смоленцев, Н.К. MATLAB. Программирование на C++, C#, Java и VBA / Н.К. Смоленцев. – М.: Изд-во ДМК Пресс, 2015. – 498 с.
18. Васильев, А.Н. Matlab. Самоучитель. Практический подход / А.Н. Васильев. – СПб.: Изд-во Наука и техника, 2012. – 448 с.

**Ямников Александр Сергеевич**  
Тульский государственный  
университет  
300012 г. Тула, пр. Ленина, 92  
Доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технология  
машиностроения»  
E-mail: yamnikovas@mail.ru

**Ямникова Ольга Александровна**  
Тульский государственный  
университет  
300012 г. Тула, пр. Ленина, 92  
Доктор технических наук,  
профессор кафедры «Технология  
машиностроения»  
E-mail: yamnikovaoa@mail.ru

**Киселев Андрей Владимирович**  
Тульский государственный  
университет  
300012 г. Тула, пр. Ленина, 92  
Студент – магистрант гр.  
640141/02Т кафедры «Технология  
машиностроения»  
E-mail: andrewkiselev1807@yandex.ru

A.S. YAMNIKOV, O.A. YAMNIKOVA, A.V. KISELYOV

## FIXING ERROR AT CONSOLE FIXING OF THE THIN-WALLED PIPE PREPARATION HAVING INITIAL OVALITY

*Influence of quantity of tightening elements and arrangement of the direction of application of forces of fixing of the aligning adaptation elements concerning an axis of a big ellipse of cross section of preparation at a size of the error of fixing caused by ovality of preparation is considered. It is shown by modeling that for round preparations the centering error decreases by stages of fixing with growth of number of tightening elements and it doesn't depend on that, even or not.*

**Keywords:** ovality, preparation, adaptation, fixing error, accuracy.

### BIBLIOGRAPHY

1. Yamnikov, A.S. Analiz sposobov ustanovki nezhestkikh zagotovok s sushchestvennymi otkloneniyami ot tsilindrichnosti / A.S. Yamnikov, V.N. Kiselev, Nguyen Khyu Luyen // Izvestiya TulGU. Tekhnologiya mashinostroyeniya. – Tula: Izd-vo TulGU. – 2004. – Vyp. 2. – S. 18–22.
2. Stepanov, YU.S. Tochnost kontrolnykh prispособleniy / YU.S. Stepanov, B.I. Afanasyev, V.B. Ilitskiy. – M.: Mashinostroyeniye-1, 2003. – 160 s.
3. Dalskiy, A.M. Tekhnologicheskoye obespecheniye nadezhnosti vysokotochnykh detaley mashin / A.M. Dalskiy. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 223 s.
4. Yashcheritsyn, P.I. Tekhnologicheskaya nasledstvennost i ekspluatatsionnyye svoystva shlifovalnykh detaley P.I. Yashchertsyn. – Minsk.: Nauka i tekhnika, 1971. – 210 s.
5. Yamnikov, A.S. Pogreshnost tsentrirovaniya trubnoy zagotovki s ovalnostyu / A.S. Yamnikov, V.N. Kiselev, Nguyen Khyu Luyen // Izv. TulGU. Mashinovedeniye, sistemy privodov i detali mashin. – TulGU, 2006. – S. 224–230.
6. Yamnikov, A.S. Geometricheskiye parametry kachestva trub / A.S. Yamnikov, V.N. Kiselev, Nguyen Khyu Luyen // Izvestiya TulGU. Tekhnologiya mashinostroyeniya. – Tula: Izd-vo TulGU, 2006. – S. 27–31.
7. Albom kontrolno-izmeritelnykh prispособleniy: uchebnoye posobiye dlya vuzov / YU.S. Stepanov, V.I. Afanasyev, A.G. Skhirtladze, A.Ye. Shchukin, A.S. Yamnikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1998. – 183 s.
8. Yamnikov, A.S. Vzaimnoye vliyaniye pogreshnostey formy i raspolzheniya sopryagayemykh poverkhnostey na odnositelnuyu ploshchad pyatna kontakta / A.S. Yamnikov, N.A. Terekhin, O.A. Yamnikova // Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii. – 2014. – № 10 (171). – S. 40–43.
9. Yamnikov A.S. Empiricheskiye zavisimosti velichiny sblizheniya kontaktiruyushchikh detaley pri impulsnoy nagruzke / A.S. Yamnikov, O.A. Yamnikova, O.S. Kashman // Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii. – 2015. – № 3. – S. 42–48.
10. Matveyev, I.A. Statisticheskii analiz tochnosti predvaritelnoy tokarnoy obrabotki trubnoy zagotovki / I.A. Matveyev, O.A. Yamnikova, A.S. Yamnikov // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki. – Tula: Izd-vo TulGU. – 2015. – Vyp. 11. – CH. 1. – S. 111–120.
11. Bykov, G.T. Dinamicheskaya model vibroustoychivosti pri tochenii tonkostennykh trub mnogoreztsovmymi golovkami / G.T. Bykov, O.A. Yamnikova, N.B. Dorokhin i A.S. Yamnikov A.S. // STIN. – 2009. № 12. – S. 17–21.
12. Yamnikova, O.A. Opredeleniye usloviy vibroustoychivogo tocheniya nezhestkikh zagotovok mnogoreztsovmymi golovkami / O.A. Yamnikova, A.S. Yamnikov // Naukoyomkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2012. – № 11. – S. 15–21.
13. Yamnikova, O.A. Kompleksnaya otsenka tekhnologichnosti detaley tipa tel vrashcheniya / O.A. Yamnikova, D.I. Troitskiy, YU.V. Balasheva // STIN. – 2008. – № 6. – S. 23–25.
14. Bykov, G.T. Vibrational stability in turning thin-walled pipe by multicutter heads / G.T. Bykov, O.A. Yamnikova, N.B. Dorokhin, A.S. Yamnikov. // Russian Engineering Research. – 2010. – 30 (3). – pp. 296 – 299.
15. Yamnikova, O.A. Evaluating The Design of Parts In The Form of Solids of Revolution / O.A. Yamnikova, D.I. Troitskii, Yu.V. Balasheva // Russian Engineering Research. – 2008. – T. 28. – № 9. – pp. 910–912.
16. Planchard, D. Official Certified SolidWorks Professional (CSWP). Certification Guide with Video Instruction: SolidWorks 2012–2014 / David Planchard. – SDC Publications, 2014. – 192 p.
17. Smolentsev, N.K. MATLAB. Programirovaniye na S++, S#, Java i VBA / N.K. Smolentsev. – M.: Izd-vo DMK Press, 2015. – 498 s.
18. Vasilyev, A.N. Matlab. Samouchitel. Prakticheskii podkhod / A.N. Vasilyev. – SPb.: Izd-vo Nauka i tekhnika, 2012. – 448 s.

**Yamnikov Alexander Sergeyevich**  
Tula state university  
Doctor of Engineering, professor of  
Technology of Mechanical  
Engineering department  
300012, Tula, Lenin Ave., 92  
E-mail: yamnikovas@mail.ru

**Yamnikova Olga Aleksandrovna**  
Tula state university  
Doctor of Engineering, professor of  
Technology of Mechanical  
Engineering department  
300012, Tula, Lenin Ave., 92  
E-mail: yamnikovaoa@mail.ru

**Kiselyov Andrey Vladimirovich**  
Tula state university  
Student undergraduate rp.  
640141/02T of Technology of  
Mechanical Engineering department  
300012, Tula, Lenin Ave., 92  
E-mail: andrewkiselev1807@yandex.ru



В.А. НОСЕНКО, А.В. АВИЛОВ, О.М. ЛАДЫГИНА, Е.А. ДУМА

## МОРФОЛОГИЯ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПЛОЩАДКИ ИЗНОСА КАРБИДА КРЕМНИЯ ПОСЛЕ МИКРОЦАРАПАНИЯ ВОЛЬФРАМА НА СКОРОСТИ 60 М/С

*Исследована морфология площадки износа карбида кремния после микроцарапания вольфрамового сплава ВРН на скорости 60 м/с и химический состав в нанослоях поверхности методом микрорентгеноспектрального анализа на микроскопе Versa 3D. Наличие вольфрама определяли сканированием по линии и площади, глубину его проникновения исследовали по микросечению. Показано, что площадка износа покрыта налипшим металлом, концентрирующимся в основном на участках с дефектами поверхности. Вольфрам проникает в микротрещины на глубину около 1 мкм и заполняет неровности, образовавшиеся в результате выкрашивания. На поверхности площадки износа карбида кремния средняя концентрация вольфрама около 5–6 % атом., а на относительно чистых участках – не более 0,09 % атом.*

**Ключевые слова:** карбид кремния, вольфрам, микроцарапание, площадка износа, морфология, химический состав, микрорентгеноспектральный анализ.

Вольфрам относится к числу самых тугоплавких и тяжелых конструкционных металлов. Чистый вольфрам используется в электротехнике, радиоэлектронике и других отраслях экономики. На основе вольфрама изготавливают большое количество сплавов, применяемых в авиационной и ракетной технике для изготовления деталей, работающих при высоких температурах: сопла реактивных двигателей, носовых частей ракет, отражательных экранов, частей плазменных двигателей. Широко используются быстрорежущие стали на основе вольфрама [1–3].

Большинство из перечисленных деталей подвергаются различным видам обработки, в том числе, шлифованию [4–8].

Наиболее распространенными абразивными материалами для изготовления шлифовальных кругов являются электрокорунд и карбид кремния. Электрокорунд предназначен в основном для обработки железоуглеродистых закаленных сталей и сплавов, карбид кремния – для сплавов на основе цветных металлов [5–7]. Например, при микроцарапании вольфрама на скорости 30 м/с износостойкость карбида кремния выше корунда. При шлифовании вольфрамосодержащих быстрорежущих сталей карбид кремния показывает хорошие результаты на чистовых операциях.

Вольфрам принадлежит к  $d$ -переходным металлам VIB подгруппы. В конденсированном состоянии основной электронной конфигурацией вольфрама является  $d^5s$  с небольшим количеством промежуточных состояний  $d^4s^2$ ,  $d^4sp$  и  $d^6s$ , что свидетельствует о высокой атомной и связующей стабильности электронной конфигурации металла [9], во многом определяющих интенсивность контактного взаимодействия пары абразив–металл при шлифовании и износ абразивного материала.

При шлифовании интенсивность контактного взаимодействия абразивного материала с металлами оценивают по количеству химических элементов, перенесенных на обработанную поверхность [10–12]. По сравнению с другими металлами, перенос, например, карбида кремния на поверхность вольфрама минимален, но износ абразивного инструмента больше, чем, например, при шлифовании титана [13], относящегося к числу наиболее адгезионно активных металлов.

Работоспособность абразивного инструмента зависит не только от переноса абразивного материала на обработанную поверхность, но и от механических свойств обрабатываемого металла, состояния рельефа рабочей поверхности абразивного инструмента и отдельных вершин зерен, контактирующих с обрабатываемым материалом при шлифовании [6, 14–16].

Исходя из этого, цель данной работы заключалась в исследовании морфологии поверхности карбида кремния после микроцарапания вольфрама.

В качестве обрабатываемого материала выбран вольфрамовый сплав марки ВРН (ТУ 48–19–106–91), содержащий не менее 99,9 % основного металла (далее вольфрам).

Микроцарапание осуществляли специально подготовленными инденторами с кристаллами технического карбида кремния зеленого. Заготовки кристаллов размером  $2 \times 2 \times 4-5$  мм получали из больших гексагональных кристаллов  $\alpha$ -SiC размером около 20 мм, образовавшихся вблизи керны в промышленных печах сопротивления на ОАО «Волжский абразивный завод». Заготовки вырезали алмазным отрезным кругом перпендикулярно граням кристалла и закрепляли в отверстии металлического индентора композиционным пломбировочным материалом. На заточном станке алмазным чашечным кругом кристалл затачивали на конус с углом 120 градусов и округляли вершину на радиус 25–30 мкм.

Микроцарапание осуществляли на прецизионном шлифовальном станке CHEVALIER с числовым программным управлением мод. Smart-B1224III в автоматическом режиме на скорости 60 м/с.

Состояние рельефа и химический состав в нанослоях поверхности площадки износа кристалла карбида кремния исследовали с использованием последних мировых достижений в области физических методов контроля качества поверхности на растровом двухлучевом электронном микроскопе FEI Versa 3D LoVac по методике [17, 18]. Прибор осуществляет всестороннее исследование морфологии и химического состава объекта, что достигается вращением предметного столика вокруг вертикальной оси и поворотом его относительно горизонта. Химический состав поверхности определяли методом микрорентгеноспектрального анализа. Исследования по глубине поверхностного слоя выполняли на микросечениях, полученных травлением ионами галлия непосредственно в камере прибора.

После микроцарапания вольфрама на вершине кристалла карбида кремния формируется площадка износа в форме окружности, на поверхности которой выделяются участки светлого фона, представляющего собой, как будет показано далее, налипший вольфрам (рисунок 1). Крупные налипы вытянуты в направлении скорости микроцарапания. Один из наиболее крупных налипов при увеличении  $4500\times$  показан на рисунке 1, а, его размеры: длина – 70 мкм, ширина – 31 мкм.

Объемное представление о морфологии площадки износа дают электронные фотографии, полученные с наклоном предметного столика, в том числе, с поворотом индентора вокруг своей оси (рисунок 1, б, в). В результате износа на площадке образовались частично разрушенные продольные бороздки, параллельные скорости микроцарапания. К поверхности площадки износа налипы прилегают не столь плотно, как, например, при микроцарапании титана [19, 20].

При увеличении  $5000-80000\times$  на площадке износа карбида кремния обнаружено большое количество трещин, частично или полностью заполненных металлом (рисунок 2, а, б). Наряду с трещинами имеются участки хрупкого разрушения (выкрашивания), также заполненные металлом (рисунок 2, в).

Для подтверждения наличия вольфрама на поверхности площадки износа, выполнен ее химический анализ методом сканирования по линии А–А (рисунок 2, а), шаг сканирования – 30 нм. Трасса сканирования пересекает три трещины, ширина которых 60–80 нм. На диаграмме (рисунок 2, з) по линии сканирования выделяются три пика концентраций вольфрама, абсциссы которых соответствуют серединам соответствующих трещин и свидетельствуют о наличии в трещинах металла.

Средняя концентрация кремния по линии сканирования  $0,69 \pm 0,30$  % атом., коэффициент вариации более 200 %. Необходимо отметить, что в отдельных участках между трещинами и в диапазоне от 1,8 до 2,8 мкм, т.е. на относительно чистых участках площадки износа, содержание вольфрама приближается к нулю.

Концентрацию вольфрама определяли методом сканирования по площади. Выбраны два относительно чистых участка площадки износа без видимых следов налипания металла (рисунок 3, а, б). Размеры участков сканирования: 1 –  $3,7 \times 4,1$  мкм; 2 –  $1,3 \times 2,3$  мкм. Концентрация вольфрама в рассмотренных участках поверхности составляет соответственно 0,07 и 0,09 % атом., относительная погрешность превышает 60 % (рисунок 3, в) С учетом доверительного интервала средние арифметические значения можно считать различающимися незначимо. Весьма малая средняя концентрация вольфрама и большая относительная погрешность измерения концентрации позволяют считать данные концентрации приближающимися к границе чувствительности прибора.

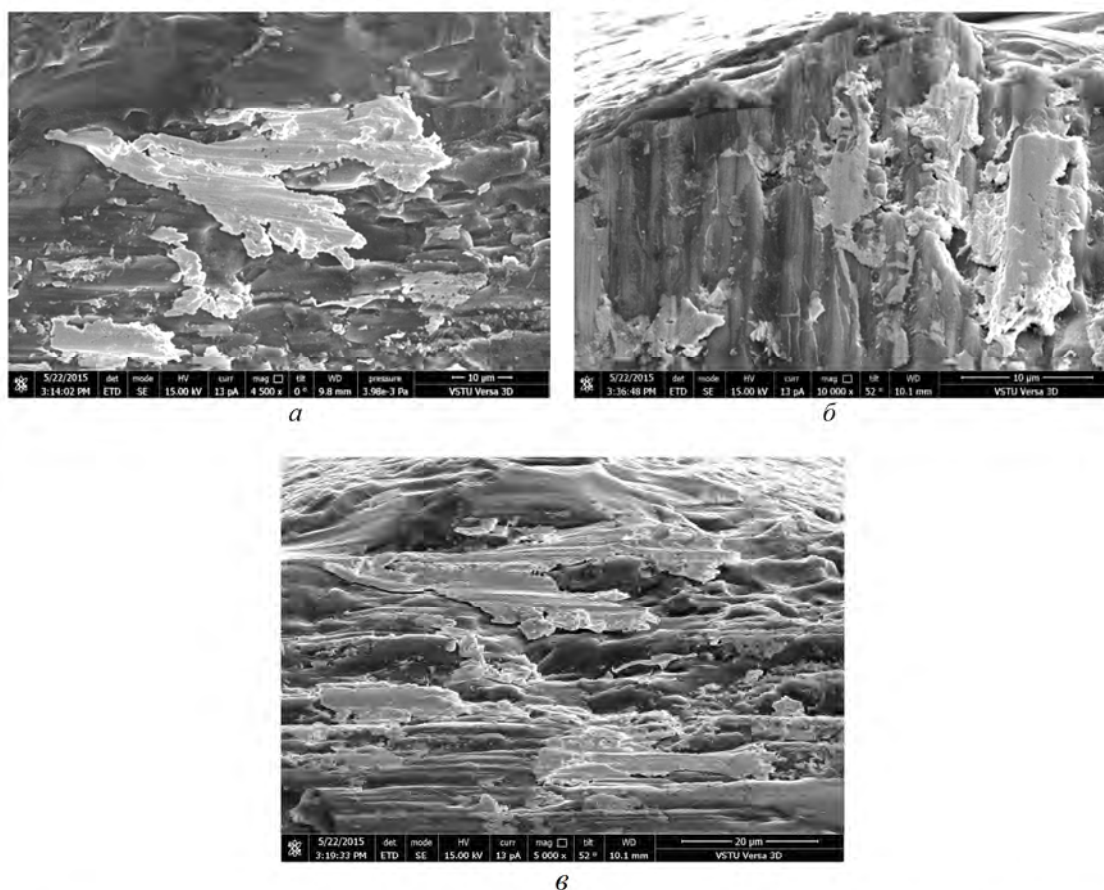


Рисунок 1 – Площадка износа карбида кремния с налипками металла после микроцарапания вольфрама

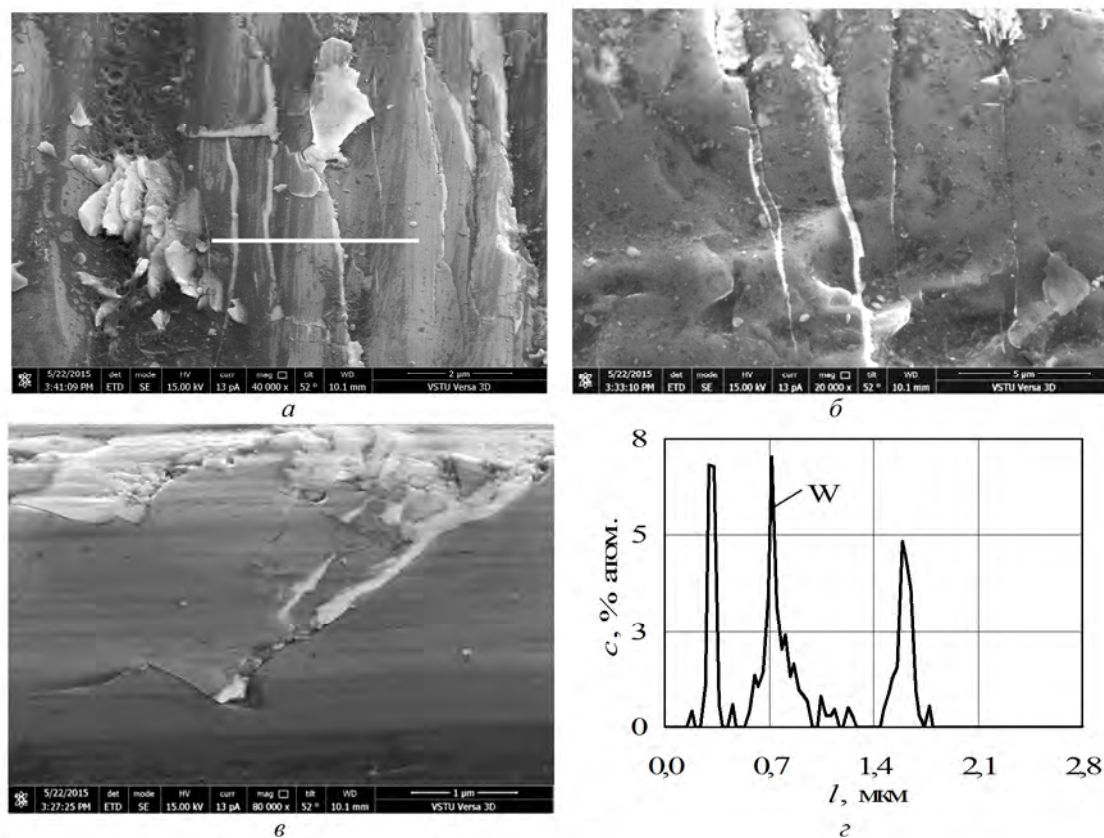


Рисунок 2 – Трещины и выкрашивания на площадке износа карбида кремния (а–в) и диаграмма распределения вольфрама по линии сканирования А–А

Содержания соответственно углерода и кремния в исследуемых двух объектах также не различаются (рисунок 3, *з*). Концентрация кремния в среднем на 10 % атом. больше углерода.

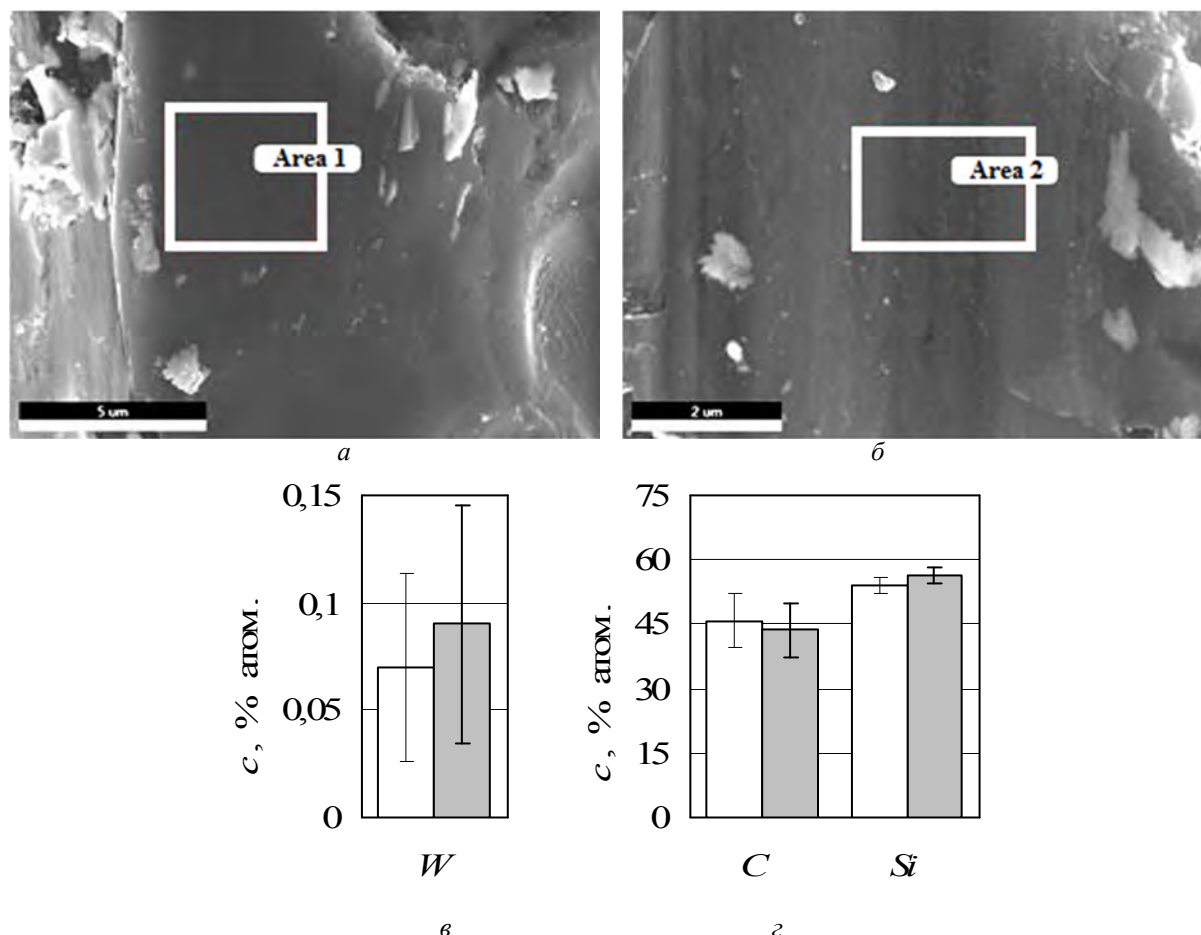


Рисунок 3 – Сканирование относительно чистых участков площадки износа по площади (а, б) и диаграмма концентрации химических элементов (в, з)

Для определения глубины проникновения вольфрама в площадку износа по линии А–А (рисунок 2, *а*) методом ионного травления выполнено микросечение (рисунок 4, *а*). Глубина трещин 1 и 2 составляет соответственно 520 и 610 нм. Окончание трещины 3 на рисунке 4, *а* определить не удалось. В связи с этим увеличение было доведено до 100000 $\times$ . На рисунке 4, *б* трещина различима хорошо, её ширина составляет около 80 нм, длина – более 4 мкм.

Трещины 1–3 частично или полностью заполнены материалом белого цвета. Для определения химического состава данного материала проведено сканирование по линии Б. Диаграмма изменения концентрации вольфрама по длине трассы сканирования представлена на рисунке 4, *в*. Пики концентрации вольфрама соответствуют координатам середины трещин 1–3. Считая, что материал белого цвета является вольфрамом, определена глубина проникновения металла в трещины. В трещину 1 вольфрам проникает на глубину около 360 нм, т.е. почти на всю её глубину, в трещину 2 – на 470 нм, в трещину 3 – на 830 нм.

Трещина 4 также исследована при увеличении 100000 $\times$ . Рисунок 4, *з* обработан с целью получения более контрастного изображения трещин. Глубина проникновения вольфрама в трещину 4 достигает 1 мкм. На глубине около 0,8 мкм от трещины 4 вправо отходит трещина 5 и на глубине около 2 мкм соединяется с трещиной 6, выходящей на поверхность кристалла. Таким образом, в рассматриваемом микросечении часть приповерхностной площади кристалла полностью отделена от основного материала трещинами 4, 5 и 6.

Для оценки общего количества вольфрама, переносимого на поверхность кристалла, концентрация металла определена методом сканирования по максимально возможной



площади, выделенной на рисунке 5, *а* прямоугольником. Размеры сторон прямоугольника  $75 \times 82$  мкм, шаг сканирования 1 мкм, общее число измерений – 6150. Средняя концентрация металла на поверхности карбида кремния после микроцарапания вольфрама достигает  $5,7 \pm 0,9$  % атом. (рисунок 5, *б*), что почти в 2 раза меньше, чем при микроцарапании титана на скорости 35 м/с [20]. Концентрации кремния и углерода в атомарных процентах не одинаковы. В среднем концентрация кремния почти на 11 % атом. больше. То же наблюдается и при сканировании относительно чистых поверхностей, где содержание вольфрама приближается к нулю (рисунок 3, *з*).

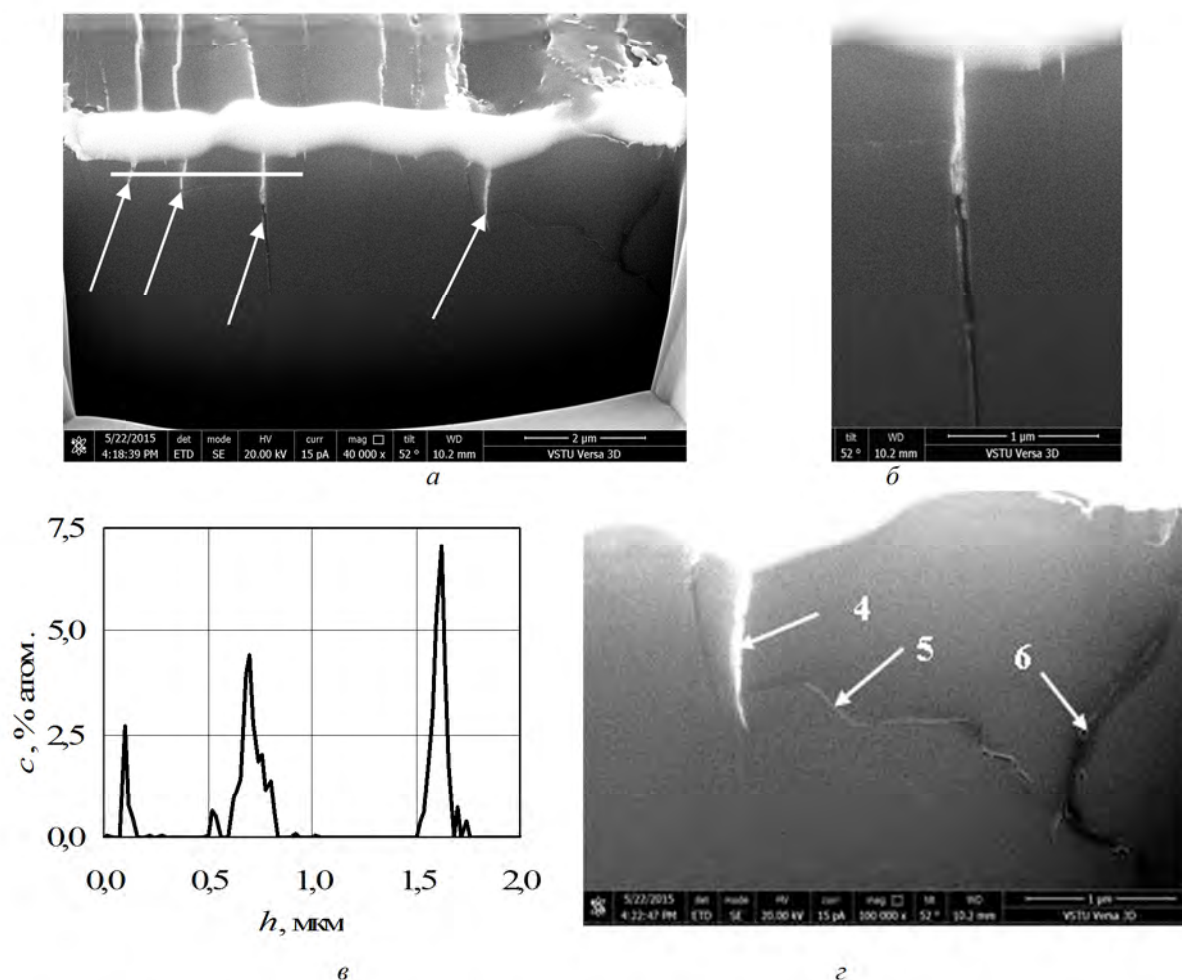


Рисунок 4 – Микросечение поверхности карбида кремния (*а*, *б*, *з*) и концентрация кремния по линии сканирования 2 (*в*): *а* –  $40000\times$ ,  $\alpha=52^\circ$ ; *б* –  $100000\times$ ,  $\alpha=52^\circ$ ; *з* –  $100000\times$ ,  $\alpha=52^\circ$

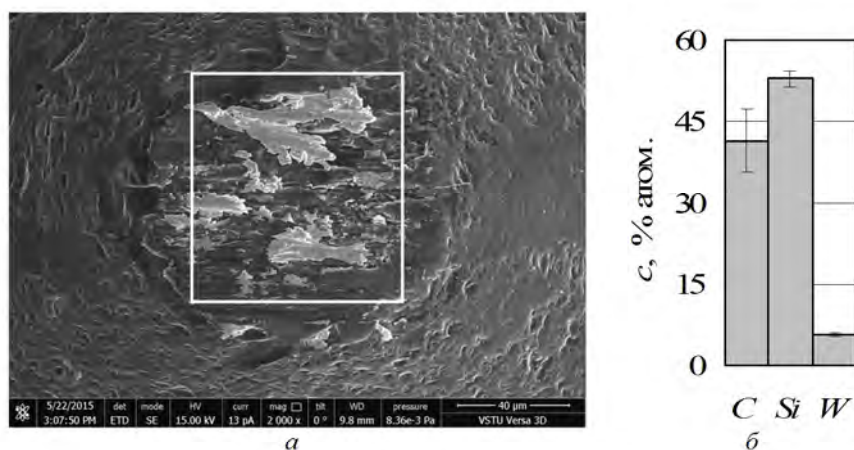


Рисунок 5 – Поверхность площадки износа с выделенной площадью сканирования (*а*) и диаграмма концентраций химических элементов (*б*)

**Выводы.**

1. При микроцарапании вольфрама на вершине кристалла карбида кремния формируется площадка износа, покрытая налипшим металлом, микротрещинами и пустотами, образовавшимися в результате выкрашивания карбида кремния. Глубина распространения микротрещин может превышать 1 мкм. Микротрещины могут соединяться, отделяя часть приповерхностного слоя карбида кремния от основного материала.

2. Основным местом скопления налипшего металла являются участки, содержащие макро и микродефекты поверхности. К поверхности площадки износа налипший металл прилегает не плотно, заполняя микротрещины и неровности, образовавшиеся в результате выкрашивания. Глубина проникновения вольфрама в микротрещины шириной 60–80 нм достигает 1 мкм. Наличие вольфрама в микротрещинах и глубина его проникновения подтверждены результатами микрорентгеноспектрального анализа.

3. Средняя концентрация металла на поверхности площадки износа карбида кремния при микроцарапании вольфрама составляет около 6 % атом., что почти в 2 раза меньше, чем при шлифовании титана на скорости 35 м/с.

*Выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 14–08–97043*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дриц, М.Е. Свойства элементов. Справочник / М.Е. Дриц, П.Б. Будберг, Г.С. Бурханов; под ред. М.Е. Дрица М.Е. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.
2. Зеликман, А.Н. Вольфрам / А.Н. Зеликман, Л.С. Никитина. – М.: Металлургия, 1978. – 272 с.
3. Осинцев, О.Е. Металловедение тугоплавких металлов и сплавов на их основе / О.Е. Осинцев. – М.: Машиностроение, 2013. – 156 с.
4. Суворов, А.А. Обработка деталей из вольфрама и его сплавов / А.А. Суворов. – М.: Машиностроение, 1978. – 134 с.
5. Носенко, В.А. Шлифование адгезионно–активных металлов: монография / В.А. Носенко. – М.: Машиностроение, 2000. – 262 с.
6. Носенко, В.А. Технология шлифования: монография / В.А. Носенко, С.В. Носенко. – Волгоград: ВолгГТУ, 2011. – 424 с.
7. Ардашев, Д.В. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик, Г.И. Буторин и др. – Челябинск: АТОКСО, 2007. – 384 с.
8. Моделирование технологических процессов абразивной обработки: коллективная монография / Г.В. Барсуков, Л.Г. Вайнер, Ю.В. Василенко и др. // М.: Издательский дом "Спектр", 2011. – 259 с.
9. Самсонов, Г.В. Электронная локализация в твердом теле / Г.В. Самсонов, И.Ф. Прядко, Л.Ф. Прядко. – М.: Наука, 1976. – 339 с.
10. Носенко, В.А. Критерий интенсивности взаимодействия обрабатываемого и абразивного материалов при шлифовании / В.А. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2001. – № 5. – С. 85–91.
11. Носенко, В.А. К вопросу об интенсивности контактного взаимодействия D–переходных металлов с карбидом кремния при шлифовании / В.А. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – № 5. – С. 78–84.
12. Горбунов Б.И. Исследование количественных характеристик шаржирования поверхности абразивом при бесцентровом шлифовании стальных деталей / Б.И. Горбунов, В.Я. Моисеев, Ю.С. Степанов // Известия вузов. Машиностроение. – 1984. – № 5. – С. 122 – 126.
13. Носенко, В.А. Влияние контактного взаимодействия на износ абразивного инструмента при шлифовании / В.А. Носенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 1. – С. 73–77.
14. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с.
15. Кремень, З.И. Шлифование суперабразивами высокопластичных сплавов / З.И. Кремень, В.Г. Юрьев. – С.–Петербург: С.–Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. – 167 с.
16. Худобин, Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов: монография / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет (Ульяновск), 2007. – 299 с.
17. Носенко, В.А. Морфология поверхности корунда после микроцарапания титанового сплава / В.А. Носенко, С.В. Носенко, А.В. Авилов, В.И. Бахмат // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 66–71.
18. Носенко, В.А. Исследование поверхности карбида кремния после взаимодействия с кобальтом при микроцарапании / В.А. Носенко, А.В. Авилов, К.В. Афанасьева, В.И. Бахмат // Новый университет. Серия: Технические науки. – 2014. – № 9 (31). – С. 68–71.
19. Носенко, В.А. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности карбида кремния после микроцарапания титана / В.А. Носенко, С.В. Носенко, А.В. Авилов, В.И. Бахмат // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 69–79.

20. Носенко, В.А., Носенко С.В., Авилов А.В., Бахмат В.И. Структура и химический состав поверхности карбида кремния после микроцарапания титана / В.А. Носенко, С.В. Носенко, А.В. Авилов, В.И. Бахмат // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 4. – С. 14–20.

**Носенко Владимир Андреевич**

Волжский политехнический институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет», г. Волжский  
Доктор технических наук, профессор, зам. директора  
по учебной работе, зав. кафедрой «Технология и  
оборудование машиностроительных производств»  
404121, Волгоградская обл., г. Волжский, ул.  
Пушкина, д. 62  
Тел. 8 (8443) 38–68–34  
E-mail: nosenko@volpi.ru

**Авилов Александр Викторович**

Волжский политехнический институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет», г. Волжский  
Кандидат технических наук, доцент, зам. зав.  
кафедрой «Технология и оборудование  
машиностроительных производств»  
404121, Волгоградская обл., г. Волжский, ул.  
Пушкина, д. 62  
Тел. 8 (8443) 39–79–17  
E-mail: avilov@volpi.ru

**Ладыгина Ольга Михайловна**

Волжский политехнический институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет», г. Волжский  
Зав. лабораторией кафедры «Технология и  
оборудование машиностроительных производств»  
404121, Волгоградская обл., г. Волжский, ул.  
Пушкина, д. 62  
Тел. 8 (8443) 39–79–17  
E-mail: omlad@mail.ru

**Дума Елена Александровна**

Волжский политехнический институт (филиал)  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет», г. Волжский  
Лаборант кафедры «Технология и оборудование  
машиностроительных производств»  
404121, Волгоградская обл., г. Волжский, ул.  
Пушкина, д. 62  
Тел. 8 (8443) 39–79–17  
E-mail: dumaelena@inbox.ru

V.A. NOSENKO, A.V. AVILOV, O.M. LADYGINA, E.A. DUMA

## THE MORPHOLOGY AND CHEMICAL COMPOSITION OF THE WEARS AREA OF THE SILICON CARBIDE AFTER MICROCUTTING OF TUNGSTEN WITH THE SPEED 60 M/S

*The wear area silicon carbide morphology after microcutting VRN tungsten alloy with the speed of 60 m/s and the chemical composition of the surface nanolayers by micro X-ray spectral analysis microscope Versa 3D was studied. The presence of tungsten was determined by scanning lines and areas, its depth of penetration was investigated by mikrosechenie. It has been shown that the wear area is covered with the adhered metal, mostly concentrating on sites with a surface defect. Tungsten enters the microcracks at a depth about 1 mkm and fills irregularities which were formed by chipping. On the surface of the silicon carbide wear area tungsten average concentration of 5–6 % atom., and the relatively clean sites – not more than 0.09 % atom.*

**Keywords:** silicon carbide, tungsten, microcutting, wear area, morphology, chemical composition, micro X-ray spectral analysis.

### BIBLIOGRAPHY

1. Drits, M.Ye. Svoystva elementov. Spravochnik / M.Ye. Drits, P.B. Budberg, G.S. Burkhanov; pod red. M.Ye. Dritsa M.Ye. – M.: Metallurgiya, 1985. – 672 s.
2. Zelikman, A.N. Volfram / A.N. Zelikman, L.S. Nikitina. – M.: Metallurgiya, 1978. – 272 s.
3. Osintsev, O.Ye. Metallovedeniye tugoplavkikh metallov i splavov na ikh osnove / O.Ye. Osintsev. – M.: Mashinostroyeniye, 2013. – 156 s.
4. Suvorov, A.A. Obrabotka detaley iz volframa i yego splavov / A.A. Suvorov. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 134 s.
5. Nosenko, V.A. Shlifovaniye adgezionno–aktivnykh metallov: monografiya / V.A. Nosenko. – M.: Mashinostroyeniye, 2000. – 262 s.
6. Nosenko, V.A. Tekhnologiya shlifovaniya: monografiya / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko. – Volgograd: VolGTU, 2011. – 424 s.
7. Ardashev, D.V. Rezhimy rezaniya na raboty, vypolnyayemye na shlifovalnykh i dovodochnykh stankakh s ruchnym upravleniyem i poluavtomatakh: spravochnik / D.V. Ardashev, D.Ye. Anelchik, G.I. Butorin i dr. – Chelyabinsk: ATOKSO, 2007. – 384 s.
8. Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov abrazivnoy obrabotki: kolektivnaya monografiya / G.V. Barsukov, L.G. Vayner, YU.V. Vasilenko i dr. // M.: Izdatelskiy dom «Spektr», 2011. – 259 s.

9. Samsonov, G.V. Elektronnaya lokalizatsiya v tverdom tele / G.V. Samsonov, I.F. Pryadko, L.F. Pryadko. – M.: Nauka, 1976. – 339 s.
10. Nosenko, V.A. Kriteriy intensivnosti vzaimodeystviya obrabatyvayemogo i abrazivnogo materialov pri shlifovanii / V.A. Nosenko // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. – 2001. – № 5. – S. 85–91.
11. Nosenko, V.A. K voprosu ob intensivnosti kontaktnogo vzaimodeystviya D–perekhodnykh metallov s karbidom kremniya pri shlifovanii / V.A. Nosenko // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. – 2002. – № 5. – S. 78–84.
12. Gorbunov B.I. Issledovaniye kolichestvennykh kharakteristik sharzhirovaniya poverkhnosti abrazivom pri bestsentrovom shlifovanii stalnykh detaley / B.I. Gorbunov, V.YA. Moiseyev, YU.S. Stepanov // Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye. – 1984. – № 5. – S. 122 – 126.
13. Nosenko, V.A. Vliyaniye kontaktnogo vzaimodeystviya na iznos abrazivnogo instrumenta pri shlifovanii / V.A. Nosenko // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. – 2005. – № 1. – S. 73–77.
14. Novoselov, YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke / YU.K. Novoselov. – Sevastopol: SevNTU, 2012. – 304 s.
15. Kremen, Z.I. Shlifovaniye superabrazivami vysokoplastichnykh splavov / Z.I. Kremen, V.G. Yuryev. – S.–Peterburg: S.–Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2013. – 167 s.
16. Khudobin, L.V. Minimizatsiya zasalivaniya shlifovalnykh krugov: monografiya / L.V. Khudobin, A.N. Unyanin. – Ulyanovsk: Ulyanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet (Ulyanovsk), 2007. – 299 s.
17. Nosenko, V.A. Morfologiya poverkhnosti korunda posle mikrotsarapaniya titanovogo splava / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko, A.V. Avilov, V.I. Bakhmat // Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. – 2014. – № 3. – S. 66–71.
18. Nosenko, V.A. Issledovaniye poverkhnosti karbida kremniya posle vzaimodeystviya s kobaltom pri mikrotsarapanii / V.A. Nosenko, A.V. Avilov, K.V. Afanasyeva, V.I. Bakhmat // Novyy universitet. Seriya: Tekhnicheskkiye nauki. – 2014. – № 9 (31). – S. 68–71.
19. Nosenko, V.A. Rentgenospektralnyy mikroanaliz poverkhnosti karbida kremniya posle mikrotsarapaniya titana / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko, A.V. Avilov, V.I. Bakhmat // Vestnik Yuzhno–Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. – 2015. – T. 15. – № 1. – S. 69–79.
20. Nosenko, V.A., Nosenko S.V., Avilov A.V., Bakhmat V.I. Struktura i khimicheskii sostav poverkhnosti karbida kremniya posle mikrotsarapaniya titana / V.A. Nosenko, S.V. Nosenko, A.V. Avilov, V.I. Bakhmat // Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal. – 2014. – № 4. – S. 14–20.

**Nosenko Vladimir Andreevich**

Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
Volgograd State Technical University, Volzhsky  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director for Teaching and Learning, Head of the Department of Technology and Equipment of Machine Building Industries  
404121, Russian Federation, Volgogradskaya Obl., Volzhsky, Pushkin St., Bldg. 62  
Тел. 8 (8443) 38–68–34  
E-mail: nosenko@volpi.ru

**Ladygina Olga Mikhailovna**

Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
Volgograd State Technical University, Volzhsky  
Head of the Laboratory of the Department of Technology and Equipment of Machine Building Industries  
404121, Russian Federation, Volgogradskaya Obl., Volzhsky, Pushkin St., Bldg. 62  
Тел. 8 (8443) 39–79–17  
E-mail: omlad@mail.ru

**Avilov Alexander Viktorovich**

Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
Volgograd State Technical University, Volzhsky  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Department of Technology and Equipment of Machine Building Industries  
404121, Russian Federation, Volgogradskaya Obl., Volzhsky, Pushkin St., Bldg. 62  
Тел. 8 (8443) 39–79–17  
E-mail: avilov@volpi.ru

**Duma Elena Aleksandrovna**

Volzhsky Polytechnic Institute (Branch) of Federal State Budget Educational Institution of Higher Education  
Volgograd State Technical University, Volzhsky  
Laboratory assistant of the Department of Technology and Equipment of Machine Building Industries  
404121, Russian Federation, Volgogradskaya Obl., Volzhsky, Pushkin St., Bldg. 62  
Тел. 8 (8443) 39–79–17  
E-mail: dumaelena@inbox.ru



## **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК: 620.179.14

П.Н. ШКАТОВ, И.О. ЛИСИЦИНА

### **СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ РАЗМЕЩЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДОВ**

*Работа посвящена сравнительному исследованию выходных характеристик электропотенциальных преобразователей двух типов, используемых для измерения глубины трещин. Электроды преобразователя первого типа размещены на общей линии, а второго типа – в углах прямоугольника. Зависимости выходного сигнала преобразователей от параметров трещин вычислялись методом конечных элементов. Показано, что при размещении электродов в углах прямоугольника достигается существенно большая относительная чувствительность к глубине трещины и значительно уменьшается погрешность измерения, связанная со смещениями электродов относительно трещины. При этом абсолютные чувствительности преобразователей обоих типов сопоставимы.*

**Ключевые слова:** электропотенциальный преобразователь, электроды, трещина, дефектометрия.

Электропотенциальный метод [1], основан на измерении электрического напряжения  $U$  между потенциальными электродами, установленными на поверхности металлического объекта, с протекающим по нему током  $I$ . Ток через контролируемый участок вводится в металл с помощью токовых электродов, контактирующих с его поверхностью. Основная область применения электропотенциального метода – измерение глубины поверхностных трещин, выявленных другими методами неразрушающего контроля. Величина напряжения  $U_r$ , измеренного на дефектном участке, отличается от напряжения  $U_0$ , измеренного на идентичном контролируемому бездефектном участке. Отношение напряжений  $U^* = (U_r - U_0)/U_0$  пропорционально глубине трещины и при пропускании постоянного тока не зависит от электрофизических свойств металла контролируемого объекта [1].

В соответствии с решаемыми задачами применяются электропотенциальные преобразователи (ЭПП) с различным размещением потенциальных и токовых электродов [2]. Для измерения глубины трещин наибольшее распространение получили преобразователи с электродами, установленными вдоль общей линии. Для краткости, в дальнейшем, будем называть такие ЭПП «линейными». Преобразователи этого типа (рисунок 1) применяются, например, в известных электропотенциальных измерителях глубины трещин фирм «Карл Дойч» (ФРГ), «Краут Кремер» (ФРГ), а также отечественном приборе «ЗОНД ИГТ–98» [3].

Взаимодействие линейных ЭПП с дефектами достаточно подробно исследовалось и отражено в многочисленных публикациях, например, в работах [4–10]. На основе выполненных исследований разработаны электропотенциальные дефектомеры, позволяющие измерять глубину поверхностных трещин в диапазоне до 100 мм с учетом влияния их длины, толщины контролируемого участка, угла наклона плоскости трещины, кривизны поверхности.

Вместе с тем, в последнее время для измерения глубины трещин находят применение ЭПП с размещением электродов по углам прямоугольника. Ранее подобные ЭПП, в основном, применялись для измерения удельной электрической проводимости [2]. В дальнейшем, для краткости, будем называть такие ЭПП «прямоугольными». Их достоинство, применительно к дефектометрии, состоит в размещении электродов вдоль трещины (рисунок 2). Это позволяет измерять глубину трещин, развивающихся вдоль линейных неоднородностей, например, вдоль галтельных переходов [11] или сварных швов [12]. Перспективно применение прямоугольных ЭПП для измерения глубины трещин, развивающихся по механизму стресс–коррозии и образующих сетку параллельных друг другу трещин [13].

Практическое использование прямоугольных ЭПП показало, что они могут эффективно применяться и для решения задач, традиционно решаемых линейными ЭПП. Вместе с тем прямоугольные ЭПП, применительно к задачам дефектометрии, исследованы

недостаточно. В связи с этим целесообразно получить основные выходные характеристики прямоугольных ЭПП и провести их сравнение с соответствующими характеристиками линейных ЭПП, как в относительных, так и абсолютных значениях. Один из наиболее принципиальных моментов – сопоставление погрешностей измерения глубины трещины при смещении электродов относительно трещины.

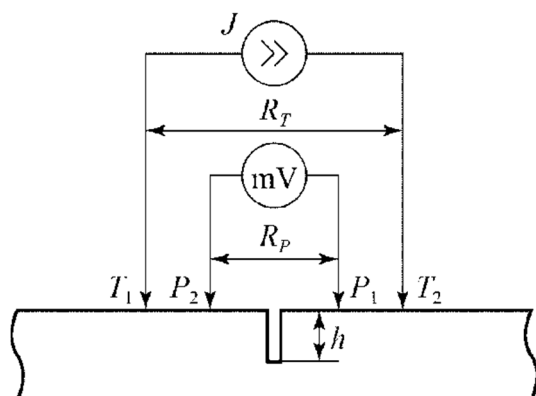


Рисунок 1 – Электропотенциальный преобразователь с размещением электродов по линии («линейный» ЭПП)

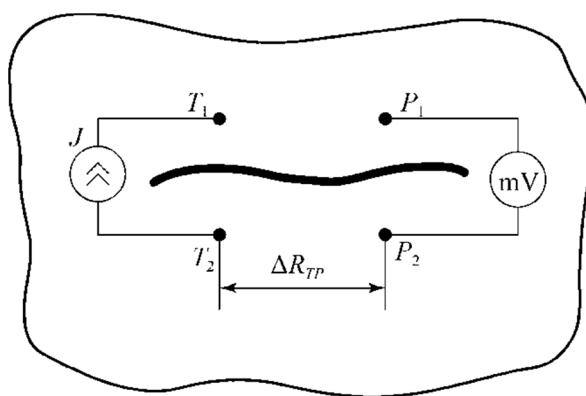


Рисунок 2 – Электропотенциальный преобразователь с размещением электродов по углам прямоугольника («прямоугольный» ЭПП)

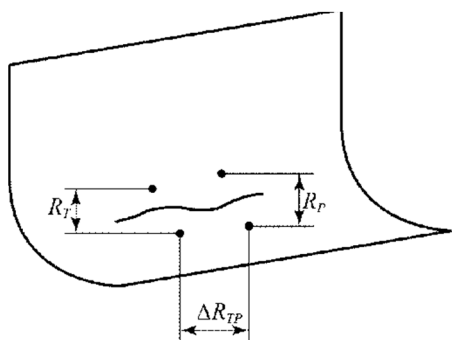


Рисунок 3 – Измерение прямоугольным ЭПП глубины трещины в галтельном переходе

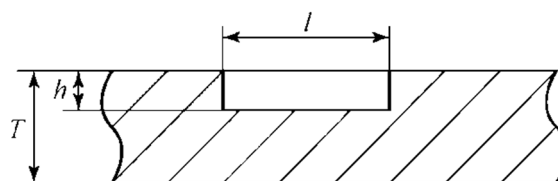


Рисунок 4 – Геометрическая модель трещины

Как известно, у линейного ЭПП с увеличением  $R_T$  абсолютная чувствительность падает, а относительная – растет. При этом увеличивается диапазон изменения глубины  $h$  трещины, при котором не происходит «насыщения» градуировочной характеристики. Подобный эффект у прямоугольных ЭПП наблюдается при увеличении как  $R_T$ , так и  $\Delta R_{TP}$  [11]. Большой интерес представляет изменение  $\Delta R_{TP}$ , так как при этом не происходит увеличения размеров установочной площадки электродов ЭПП в направлении ортогональном плоскости трещины. Это важно при измерениях на криволинейной поверхности, а также в зоне сетки параллельных трещин.

Расчетно-теоретические исследования взаимодействия ЭПП обоих типов с трещинами выполнялись методом конечных элементов. Принималось, что трещина прямоугольной формы с глубиной  $h$  и длиной  $\ell$ , находится в металлической пластине толщиной  $T$  (рисунок 4). Плоскость трещины перпендикулярна поверхности пластины. На рисунке 5 приведена расчетная область после дискретизации. Сетка сгущается в зонах установки токовых электродов, так как здесь имеет место более резкое изменение плотности тока.

При расчетах принималось, что расстояние  $R_p$  между потенциальными электродами фиксировано и одинаково для обоих типов ЭПП. У линейного преобразователя варьировалось расстояние  $R_T$  между токовыми электродами, а прямоугольного – величина  $\Delta R_{TP}$ .

Расчеты проводились для нормированных параметров. Все геометрические размеры нормировались по расстоянию  $R_p$  между потенциальными электродами. Таким образом  $R_p^* = 1$ ,  $R_T^* = R_T/R_p$ ,  $h^* = h/R_p$ ,  $\ell^* = \ell/R_p$ ,  $T^* = T/R_p$ . Вносимое трещиной напряжение  $U_{вн}$  нормировалось по напряжению  $U_0$  на бездефектном участке, т.е.  $U_{вн}^* = U_{вн}/U_0$ .

Вместе с тем, для корректного сравнения выходных характеристик обоих преобразователей проводилось сравнение и для абсолютных значения  $U_{вн}$ , так как значения

$U_0$  для линейного и прямоугольного ЭПП, при сопоставимых межэлектродных расстояниях, существенно отличаются.

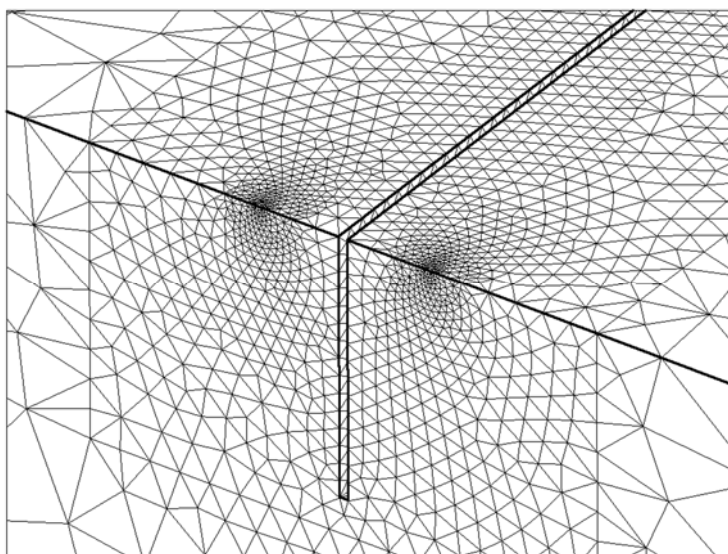


Рисунок 5 – Расчетная область после дискретизации

На рисунках 6 и 7 приведены зависимости вносимого в ЭПП нормированного напряжения  $U_{вн}^*$  от нормированной глубины  $h^*$  дефекта в полупространстве при разных нормированных межэлектродных расстояниях. Для линейного ЭПП изменялась величина расстояния  $R_T$  (рисунок 6), а для прямоугольного –  $\Delta R_{TP}^*$  (рисунок 7). Расчеты проводились для значений  $\Delta R_{TP}^*$  и  $R_T$  при которых расстояния между токовым и ближнем к нему потенциальным электродами в обоих вариантах равны. Нормированная длина дефектов принималась  $\ell^*=20$ . При данной величине  $\ell^*$  ее дальнейшее увеличение не приводит к изменению вносимого напряжения.

Из приведенных рисунков видно, что чувствительность прямоугольного ЭПП примерно на порядок выше, чем у линейного. Вместе с тем, абсолютные значения вносимых напряжений для обоих типов ЭПП сопоставимы. Это иллюстрируется графиками на рисунках 8–9, построенными для  $U_{вн}$  при следующих параметрах:  $R_p = 10$  мм, удельная электрическая проводимость металла контролируемого объекта  $\sigma = 2,8$  Мсм/м, ток, протекающий между токовыми электродами  $I = 1$  А.

Кажущееся несоответствие объясняется следующим образом. На бездефектном участке плотность тока на линии, проходящей через токовые электроды существенно больше, чем плотность тока, протекающего через зоны, смещенные от этой линии. С точки зрения электрической схемы замещения, это можно трактовать, как распределение токов в двух параллельно соединенных ветвях с сопротивлениями  $R_{ц}$  (через центр) и  $R_6$  (сбоку) при  $R_{ц} \ll R_6$ . При наличии дефекта в обе ветви вводится сопротивление  $R_d > R_{ц}$ . Это приводит к выравниванию токов в обеих ветвях. За счет этого напряжение холостого хода для прямоугольного ЭПП существенно ниже, чем для линейного, а напряжения вносимые дефектом для обоих ЭПП сопоставимы.

Так как реальные дефекты имеют извилистость важно оценить влияние смещения электродов на регистрируемые сигналы и, конечном счете, на возникающую за счет смещения электродов от следа трещины погрешность измерения.

На рисунках 9–10 приведены зависимости  $U_{вн}^* = U_{вн}^*(h^*, S^*)$ , где  $S^*$  – относительное смещение оси симметрии ЭПП относительно плоскости трещины, для обоих типов ЭПП. Из приведенных графиков следует, что выходной сигнал прямоугольного ЭПП существенно меньше зависит от величины  $S^*$ . Благодаря этому и относительная погрешность измерения глубины трещины, обусловленная смещениями электродов, у прямоугольного ЭПП существенно ниже. Это иллюстрируется графиками, приведенными на рисунках 11–12, где приведены зависимости  $\Delta h^* = \Delta h^*(h^*, S^*)$ . На рисунках 13–14 показано изменение относительной погрешности измерения нормированной глубины дефекта в функции  $h^*$  при разных величинах относительного смещения  $S$ .

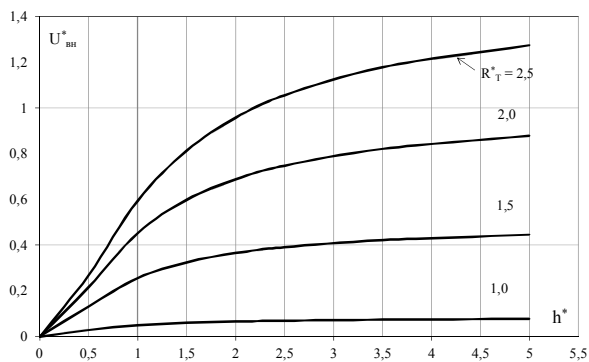


Рисунок 6 – Зависимости  $U^*_{вн} = U^*_{вн}(h^*, R^*_T)$  для линейного ЭПП при  $T \rightarrow \infty$

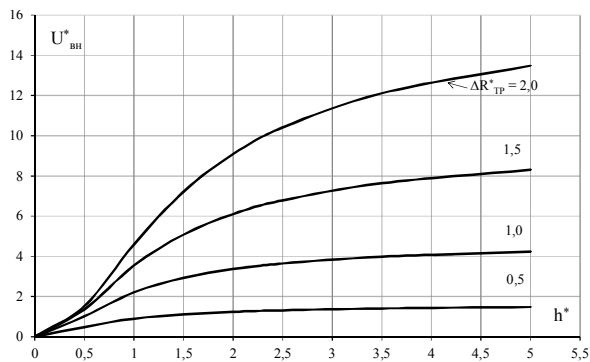


Рисунок 7 – Зависимости  $U^*_{вн} = U^*_{вн}(h^*, \Delta R^*_{TP})$  для прямоугольного ЭПП при  $T \rightarrow \infty$

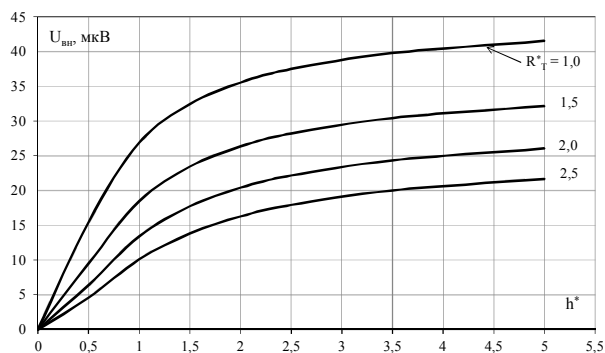


Рисунок 8 – Зависимости  $U_{вн} = U_{вн}(h^*, R_T)$  для линейного ЭПП при  $R_p=10$  мм,  $I=1$  А,  $\sigma=2,8$  Мсм/м,  $T \rightarrow \infty$

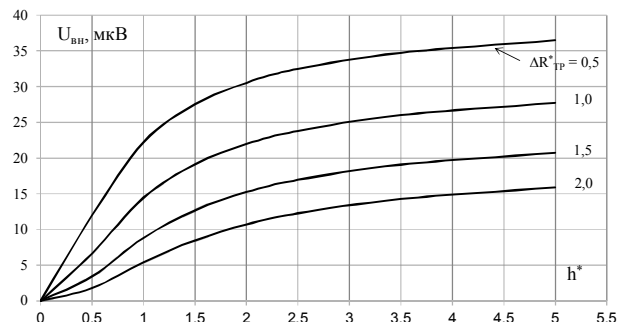


Рисунок 9 – Зависимости  $U_{вн} = U_{вн}(h^*, \Delta R^*_{TP})$  для линейного ЭПП при  $R_p=10$  мм,  $I=1$  А,  $\sigma=2,8$  Мсм/м,  $T \rightarrow \infty$

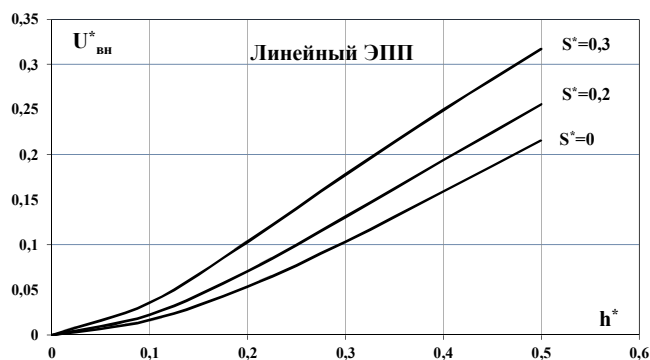


Рисунок 9 – Зависимость  $U^*_{вн} = U^*_{вн}(h^*, S^*)$  для линейного ЭПП при  $R^*_T=2$

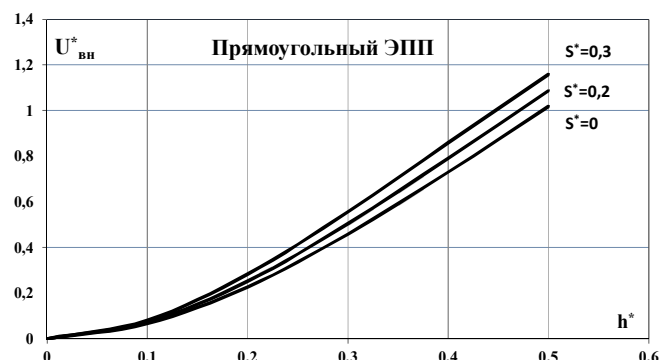


Рисунок 10 – Зависимость  $U^*_{вн} = U^*_{вн}(h^*, S^*)$  для прямоугольного ЭПП при  $R^*_T=2$

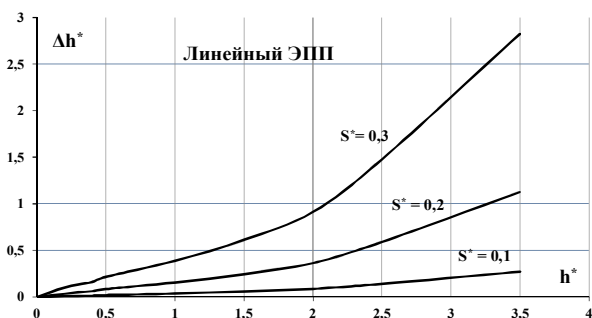


Рисунок 11 – Зависимость  $\Delta h^* = \Delta h^*(h^*, S^*)$  для линейного ЭПП при  $R^*_T=2$

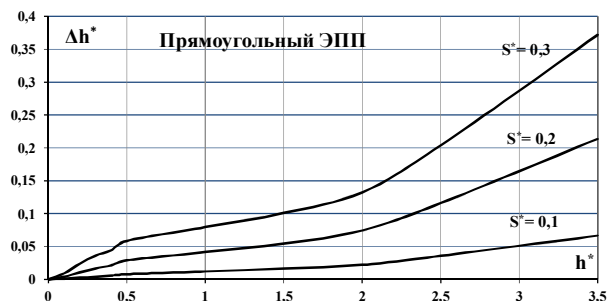


Рисунок 12 – Зависимость  $\Delta h^* = \Delta h^*(h^*, S^*)$  для прямоугольного ЭПП при  $R^*_T=2$

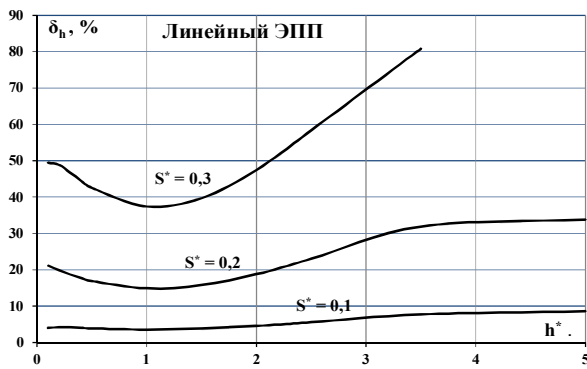


Рисунок 13 – Зависимость  $\delta_{h,\%} = \delta_{h,\%}(h^*, S^*)$  для линейного ЭПП при  $R_T=2$

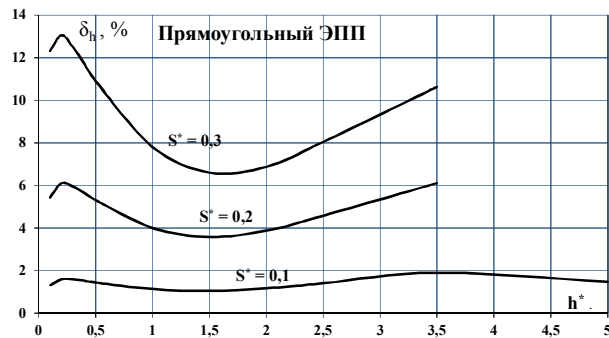


Рисунок 14 – Зависимость  $\delta_{h,\%} = \delta_{h,\%}(h^*, S^*)$  для прямоугольного ЭПП при  $R_T=2$

Из приведенных зависимостей следует, что для прямоугольного ЭПП погрешности, связанные со смещениями оси симметрии ЭПП относительно следа трещины, более, чем в 5 раз меньше. Это весьма важно при измерении глубины извилистых трещин.

На основании проведенных исследований можно отметить:

1. Линейный и прямоугольный ЭПП имеют сопоставимые абсолютные чувствительности к глубине трещин.
2. Нормированные по холостому ходу вносимые дефектом напряжения у прямоугольного ЭПП существенно выше, за счет существенно меньшей величины холостого хода.
3. Зависимости  $U_{вн}^* = U_{вн}(h^*, R_T^*)$  для линейного ЭПП и  $U_{вн}^* = U_{вн}(h^*, \Delta R_{TP}^*)$  сопоставимы при  $\Delta R_{TP}^* = (R_T^* - R_P^*)/2$ .
4. Прямоугольный ЭПП имеет, по сравнению с линейным ЭПП, существенно меньшую погрешность измерения при смещениях оси симметрии ЭПП относительно плоскости дефекта.
5. Проведенный анализ показывает целесообразность применения прямоугольных ЭПП для решения ряда задач, решаемых в настоящее время с помощью линейного ЭПП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль. Вавилов В.П., Подмастерьев К.В., Соснин Ф.Р., Корндорф С.Ф., Ногачева Т.И., Пахолкин Е.В., Бондарева Л.А., Мужикский В.Ф. Справочник в 8 томах / Под общей редакцией В.В. Клюева. М., 2006. Том 5 Книга 1. Тепловой контроль. Книга 2. Электрический контроль (2-е издание, исправленное).
2. Брайнин, Э.И. Контроль элементов электрических машин и аппаратов электропотенциальным методом / Э.И. Брайнин. – М.: Энергия, 1980. – 80 с.
3. Шкатов, П.Н. Компьютеризированный измеритель глубины трещин «ЗОНД ИГТ-98» / П.Н. Шкатов // «Контроль. Диагностика» Машиностроение. – 1998. – № 2. – С. 49–54.
4. Shkatov, P.N. Increased preciseness of deep defects defecting through electropotential method / P.N. Shkatov // 7<sup>th</sup> European Conference on NDT, Copenhagen, 1998.
5. Шкатов, П.Н. Решение обратной задачи электропотенциальной дефектометрии для поверхностной трещины конечной длины / П.Н. Шкатов // Тезисы докладов 3-ей международной НТК «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике». – М. – 2002.
6. Шкатов, П.Н. Теоретическое исследование выходных характеристик электропотенциального преобразователя при его взаимодействии с наклонными трещинами конечной длины / П.Н. Шкатов, П.И. Черненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 6 (293). – 2012. – С. 48–52.
7. Шкатов, П.Н. Исследование погрешности измерения глубины трещин электропотенциальным методом / П.Н. Шкатов // Тезисы докладов 14-ой российской НТК «Неразрушающий контроль и диагностика», М. – 1996.
8. Makoto, Akama Nondestructive sizing of a 3D surface crack generated in a railway component using closely coupled probes for direct-current potential drop technique / Akama Makoto, Saka Masumi // Engineering Fracture Mechanics. – 2005. – Vol. 72. – Issue 2. – pp. 319–334.
9. Hicks, M.A. A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical drop technique for crack length determination / M.A. Hicks, A.C. Pickard // International Journal of Fracture. – 1982. – pp. 91–101.
10. Cláudio, R.A. Development of a DC potential drop system controlled by computer / R.A. Cláudio, J. Maia, J.M. Dias Pereira, R. Baptista, C.M. Branco, J. Byrne // 9th Portuguese Conference on Fracture – ESTSetúbal, Ed. by SPM (Portuguese Society of Materials). – 2004.
11. Шкатов, П.Н. Измерение глубины трещин на цилиндрических поверхностях и в области галтельных переходов электропотенциальным методом / П.Н. Шкатов, А.А. Елисов // Приборы. – 2013. – № 4. – С. 12–15.
12. Prajapati, S. Potential drop detection of creep damage in the vicinity of welds / S. Prajapati, P.B. Nagy, P. Cawley // NDT&EInternational 47. – 2012. – pp. 56–65.

13. Сагарадзе, В.В. Коррозионное растрескивание аустенитных и ферроперлитных сталей / В.В. Сагарадзе, Ю.И. Филиппов, А.Ф. Матвиенко, Б.И., Мирошниченко В.Е., Лоскутов, В.А. Канайкин. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2004. – 278 с.

**Шкатов Петр Николаевич**  
ФГБОУ ВПО «Московский технологический университет», г. Москва  
Доктор технических наук, профессор  
Тел. (495) 964-91-50  
E-mail: petr\_shkatov@mail.ru

**Лисицина Ирина Олеговна**  
ФГБОУ ВПО «Московский технологический университет», г. Москва  
Аспирантка  
Тел. (495) 964-91-50  
E-mail: lisitsina.ks@gmail.com

P.N. SHKATOV, I.O. LISITSINA

## A COMPARATIVE STUDY DEFENDAMERICA ELECTROPOTENTIAL PROBES WITH DIFFERENT THE PLACEMENT OF ELECTRODES

*The work is devoted to comparative study of the output characteristics of the electrical potential of the two types of probes used to measure the depth of cracks. The electrodes of the probe of the first type placed on a common line, and the second type – in the corners of the rectangle. Dependence of the output signal of the inverter from parameters of cracks was calculated using finite element method. It is shown that the placement of electrodes in the corners of the rectangle is achieved much higher relative sensitivity to the crack depth, thus greatly reducing the measurement error associated with the displacement of the electrodes relative to the crack. The absolute sensitivity of the probes of both types is comparable.*

**Keywords:** electrical potential probe, electrodes, crack, flaw metering.

## BIBLIOGRAPHY

1. Nerazrushayushchiy kontrol. Vavilov V.P., Podmasteryev K.V., Sosnin F.R., Korndorf S.F., Nogacheva T.I., Pakholkin Ye.V., Bondareva L.A., Muzhitskiy V.F. Spravochnik v 8 tomakh / Pod obshchey redaktsiyey V.V. Klyuyeva. M., 2006. Tom 5 Kniga 1. Teplovoy kontrol. Kniga 2. Elektricheskiy kontrol (2-ye izdaniye, ispravlennoye).
2. Braynin, E.I. Kontrol elementov elektricheskikh mashin i apparatov elektropotentsialnym metodom / E.I. Braynin. – M.: Energiya, 1980. – 80 s.
3. Shkatov, P.N. Kompyuterizirovannyi izmeritel glubiny treshchin «ZOND IGT-98» / P.N. Shkatov // «Kontrol. Diagnostika» Mashinostroyeniye. – 1998. – № 2. – S. 49–54.
4. Shkatov, P.N. Increased preciseness of deep defects defecting through electropotential method / P.N. Shkatov // 7th European Conference on NDT, Copenhagen, 1998.
5. Shkatov, P.N. Resheniye obratnoy zadachi elektropotentsialnoydefektometrii dlya poverkhnostnoy treshchiny konechnoy dliny / P.N. Shkatov // Tezisy dokladov 3-ey mezhdunarodnoy NTK «Kompyuternyye metody i obratnyye zadachi v nerazrushayushchem kontrole i diagnostike». – M. – 2002.
6. Shkatov, P.N. Teoreticheskoye issledovaniye vykhodnykh kharakteristik elektropotentsialnogo preobrazovatelya pri yego vzaimodeystvii s naklonnymi treshchinami konechnoy dliny / P.N. Shkatov, P.I. Chernenko // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – № 6 (293). – 2012. – S. 48–52.
7. Shkatov, P.N. Issledovaniye pogreshnosti izmereniya glubiny treshchin elektropotentsialnym metodom / P.N. Shkatov // Tezisy dokladov 14-oy rossiyskoy NTK «Nerazrushayushchiy kontrol i diagnostika», M. – 1996.
8. Makoto, Akama Nondestructive sizing of a 3D surface crack generated in a railway component using closely coupled probes for direct-current potential drop technique / Akama Makoto, Saka Masumi // Engineering Fracture Mechanics. – 2005. – Vol. 72. – Issue 2. – pp. 319–334.
9. Hicks, M.A. A comparison of theoretical and experimental methods of calibrating the electrical drop technique for crack length determination / M.A. Hicks, A.C. Pickard // International Journal of Fracture. – 1982. – pp. 91–101.
10. Cláudio, R.A. Development of a DC potential drop system controlled by computer / R.A. Cláudio, J. Maia, J.M. Dias Pereira, R. Baptista, C.M. Branco, J. Byrne // 9th Portuguese Conference on Fracture – ESTSetúbal, Ed. by SPM (Portuguese Society of Materials). – 2004.
11. Shkatov, P.N. Izmereniye glubiny treshchin na tsilindricheskikh poverkhnostyakh i v oblasti galtelnykh perekhodov elektropotentsialnym metodom / P.N. Shkatov, A.A. Yelisov // Pribory. – 2013. – № 4. – S. 12–15.
12. Prajapati, S. Potential drop detection of creep damage in the vicinity of welds / S. Prajapati, P.B. Nagy, P. Cawley // NDT&EInternational 47. – 2012. – pp. 56–65.
13. Sagaradze, V.V. Korroziionnoye rastreskivaniye austenitnykh i ferropertlitnykh staley / V.V. Sagaradze, YU.I. Filippov, A.F. Matviyenko, B.I., Miroshnichenko V.Ye., Loskutov, V.A. Kanaykin. – Yekaterinburg: UrO RAN. – 2004. – 278 s.

**Shkatov Peter Nikolaevich**  
«Moscow technological University», Moscow  
Ph. D., Professor,  
Ph.: (495) 964-91-50  
E-mail: petr\_shkatov@mail.ru

**Lisitsina Irina Olegovna**  
«Moscow technological University», Moscow  
postgraduate student  
Ph.: (495) 964-91-50  
E-mail: lisitsina.ks@gmail.com

УДК 620.1.05:620.179

А.В. ЖИДКОВ, М.П. ЖИЛЬЦОВ, А.А.ЛУПАНДИН, С.С. ВЬЮН,  
О.А. ЛОБОДА, В.В. МИШИН, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ

## ПРОГРАММНО–АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭНДОПРОТЕЗА ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА С ПАРОЙ ТРЕНИЯ «МЕТАЛЛ–МЕТАЛЛ»

*В статье рассмотрены математическая модель изменения сопротивления под воздействием внешней плавающей нагрузки, структура и принцип действия программно–аппаратного комплекса для экспериментальных исследований параметров процессов, происходящих в зоне контакта эндопротеза с парой трения «металл–металл», а также представлен алгоритм системы сбора данных. Программно–аппаратный комплекс предназначен для изучения процессов, протекающих в узле трения эндопротеза (в ходе его трибоиспытаний) в условиях, приближенных к реальным. Использование комплекса позволяет проводить научно–обоснованные испытания взаимодействующих сферических поверхностей с парой трения «металл–металл».*

**Ключевые слова:** трибодиагностика, трибомониторинг, испытания, граничные слои, сферические поверхности, испытательные машины, смазка, электрорезистивный метод, трение, трибосопряжение, износ, устройство.

Эндопротезы тазобедренных суставов с парой трения «металл–металл» все чаще используются в операциях по замене поврежденного сустава. Это обусловлено данными исследований, свидетельствующими о том, что такие типы имплантатов имеют меньший износ [1], в связи с использованием высокотехнологичного производства изготовления головки и чашки эндопротеза с применением износостойких материалов кобальт–хромового сплава.

Несмотря на прочность используемых материалов, основная причина разрушения и снижения эффективности функционирования эндопротеза заключается в процессе износа в зоне контакта двух твердых поверхностей. Трение, как одно из главных составляющих факторов, существенно влияет на износ внедренного в тело человека эндопротеза, в результате чего могут образовываться частицы металла, вызывающие остеолит, металлоз, расшатывание компонентов эндопротеза, приводящие к необходимости проведения повторной операции эндопротезирования.

Кроме того, производство эндопротезов допускает вероятность наличия бракованных и дефектных компонентов на стадии их изготовления, что влечет за собой опасность для здоровья пациентов. Так, фирма DePuy внедрила более 93000 имплантатов до того, как дефекты в конструкции и изготовлении эндопротеза были обнаружены. Похожая ситуация случилась в Великобритании с производителем эндопротезов тазобедренных суставов с парой трения «металл–металл» ASR, где после непродолжительного эксплуатации внедренных имплантатов пациенты чувствовали сильную боль и были вынуждены прибегнуть к повторной операции по удалению дефектного эндопротеза [2].

В этой связи становится очевидной актуальность задачи диагностирования и контроля состояния эндопротезов тазобедренных суставов с парой трения «металл–металл» на этапе их производства.

Для решения поставленной задачи, а также для исследования процессов, протекающих в зоне контактирования двух компонентов эндопротеза, предлагается разработка программно–аппаратного комплекса для испытания эндопротезов тазобедренных суставов с парой трения «металл–металл». В основу разработки заложен электрорезистивный метод диагностирования, возможность и эффективность применения которого для трибомониторинга различных объектов с рассмотрением принципов построения средств диагностирования рассмотрены в работах [3–5], а предложения по использованию для диагностики эндопротезов – в [6].

На начальном этапе исследований предложена математическая модель, позволяющая оценить уровень электрического сопротивления трибосопряжений головки и чашки эндопротеза с учетом его реальной и моделируемой макро и микрогеометрии. Модель предназначена для расчета как механических характеристик контакта (деформация, площадь фактического контакта и др.), так и электрических (сопротивление контакта и его изменение во времени под воздействием внешней плавающей нагрузки).

Один из вариантов моделирования эндопротеза сустава, в частности коленного, представлен в [7]. Применительно к тазобедренному суставу потребовалась разработка иной модели, учитывающей циклическое нагружение сустава и специфику геометрии головки и чашки эндопротеза.

В основу моделирования заложены подходы, рассмотренные в [8, 9]. Исходными допущениями расчетной модели являются гипотезы: материалы контактирующих тел однородны и изотропны; контакт имеет дискретный характер и происходит по вершинам отдельных выступов шероховатости, вступивших в контакт; деформация выступов имеет пластический характер и описывается теорией Герца для контакта двух криволинейных гладких тел с первоначальным касанием в точке; размеры единичных площадок контакта малы по сравнению с размерами контактирующих тел; распределение пятен контакта по его поверхности равномерное.

Исходными данными для расчета являются:

1) условия взаимодействия и геометрия контактирующих тел:  $R_1$  – радиус головки эндопротеза;  $P_f$  – внешняя контактная нагрузка;  $f$  – частота изменения внешней контактной нагрузки;  $h$  – высота соприкосновения головки и чашки эндопротеза;

2) параметры шероховатости поверхностей:  $R_{a1}, R_{a2}$  – соответственно, среднее арифметическое отклонение профиля головки и чашки эндопротеза;  $R_{\max}$  – максимальная шероховатость поверхностей;  $S_{m1}, S_{m2}$  – средний шаг неровностей;  $S_1, S_2$  – средний шаг местных выступов профиля;

3) механические характеристики материалов контактирующих тел:  $E_1, E_2$  – модуль Юнга (модуль упругости);  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициент Пуассона;  $H$  – микротвердость материала.

Основные зависимости модели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Базовые зависимости математической модели

$E' = \left( \frac{(1 - \mu_1)^2}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2)^2}{E_2} \right)^{-1}$	(1)
$\sigma' = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot (R_{a1}^2 + R_{a2}^2)}$	(2)
$R = \frac{3}{(16 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi^2)} \cdot \left( \frac{(S_{m1} \cdot S_{m2} \cdot S_1 \cdot S_2)}{(R_{a1}^2 \cdot S_{m2}^2 \cdot S_2^2 + R_{a2}^2 \cdot S_{m1}^2 \cdot S_1^2)^{\frac{1}{2}}} \right)$	(3)
$D' = \left( \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot \sqrt{3}} \right) \cdot \frac{((R_{a1} \cdot S_{m2} \cdot S_2)^2 + (R_{a2} \cdot S_{m1} \cdot S_1)^2)}{(S_1 \cdot S_2)^2 \cdot ((R_{a1} \cdot S_{m2})^2 + (R_{a2} \cdot S_{m1})^2)}$	(4)
$\alpha' = \left( \frac{(\sigma' \cdot D' \cdot R)}{2,336 \cdot 10^{-2}} \right)^2$	(5)
$\psi = \frac{E'}{H} \cdot \sqrt{\frac{\sigma'}{R}}$	(7)

В соответствии с механическими характеристиками материалов для математической модели используется приведенный модуль упругости (1). Для расчета предусматривается переход от параметров двух шероховатых поверхностей к параметрам одной эквивалентной шероховатой поверхности: среднеквадратическое отклонение профиля относительно средней линии шероховатой поверхности (2); средний радиус закругления вершин (3); плотность выступов на единицу площади (4); условный параметр шероховатости (5). Расчет высот вершин ведется от средней линии выступов, поэтому в качестве среднеквадратического



отклонения высот вершин определяется по формуле (6). Оценка характера деформирования неровностей производится по индексу пластичности для металлов (7).

Для расчета приведенных выше величин выбраны следующие значения параметров, характерные для реальных эндопротезов:

– геометрия контактирующих тел и режимы взаимодействия:  $R_1 = 17,5$  мм;  $h = 1$  мм;  $P_f = 100 \dots 200$  Н;  $f = 10$  Гц;

– стандартные параметры шероховатости поверхностей:  $R_{a1} = 0,4$  мкм;  $R_{a2} = 0,4$  мкм;  $R_{max} = 3,2$  мкм;  $S_{m1} = 180$  мкм;  $S_{m2} = 180$  мкм;  $S_1 = 100$  мкм;  $S_2 = 80$  мкм;

– механические характеристики материалов контактирующих тел:

$E_1 = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $E_2 = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu_1 = 0,25$ ;  $\mu_2 = 0,25$ ;  $H = 2500$  МПа.

Математическая модель включает в себя нагрузку, плавно изменяющуюся по гармоническому закону, соответствующему характеру изменения в реальном эндопротезе (рисунок 1).

Подставляя принятые значения параметров, по формулам (1) – (6) получим:  $E' = 1,778 \cdot 10^5$  МПа;  $\sigma' = 0,709$  мкм;  $R = 3,776 \cdot 10^2$  мкм;  $D' = 1,549 \cdot 10^{-4}$  мкм<sup>-2</sup>;  $\alpha' = 3,153$ . Тогда индекс пластичности:  $\Psi = 3,081$ .

Индекс пластичности  $\Psi > 1$  свидетельствует о том, что дальнейший расчет следует проводить для пластического шероховатого контакта. При этом фактическая площадь контакта определяется выражением (8), ее переход к безразмерной величине – выражением (9), а номинальная площадь контакта – выражением (10).

$$A_r = P/H, \quad (8)$$

$$\tilde{A}_r = \frac{A_r}{2 \cdot \pi \cdot D' \cdot R \cdot \sigma' \cdot A_a} \quad (9)$$

$$A_a = 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot h_{sp}. \quad (10)$$

Внешняя нагрузка на головку эндопротеза носит циклический характер, поэтому в соответствии с формулой (8) фактическая площадь контакта также будет изменяться циклично (рисунок 2).

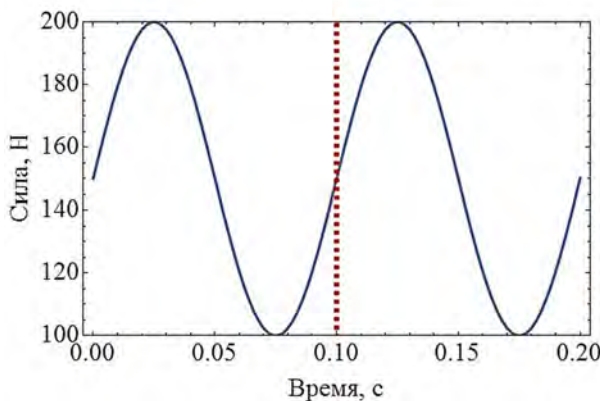


Рисунок 1 – Изменение внешней нагрузки на головку эндопротеза от времени

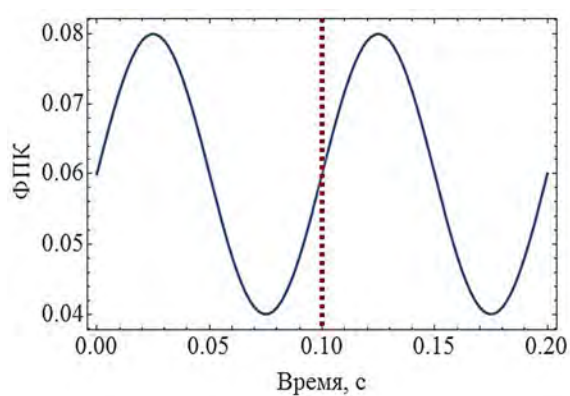


Рисунок 2 – Изменение фактической площади контакта от времени

Из таблицы интегралов [9] определяются минимальное и максимальное ближайшие к  $\tilde{A}_r$  значения  $F_1(h)$ , и соответствующие этому ряду  $F_{3/2}(h)$ ,  $F_0(h)$  для определения числа контактирующих неровностей,  $F_{1/2}(h)$  – для оценки электропроводности реального контакта, где  $h$  – уровень деформации шероховатого слоя при заданной внешней нагрузке и пластическом характере деформирования.

$$\begin{aligned} F_{min0} &= 0,9899 \cdot 10^{-2}; \\ F_{min1/2} &= 0,4626 \cdot 10^{-2}; \\ F_{min1} &= 0,299 \cdot 10^{-2}; \\ F_{min3/2} &= 0,2138 \cdot 10^{-2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{max0} &= 0,5309 \cdot 10^{-2}; \\ F_{max1/2} &= 0,2392 \cdot 10^{-2}; \\ F_{max1} &= 0,1512 \cdot 10^{-2}; \\ F_{max3/2} &= 0,1055 \cdot 10^{-2}. \end{aligned}$$

Определяется среднее значение интегральных параметров  $F_n(h)$ :

$$F_0 = 0,5 (F_{min0} + F_{max0}); \quad (11)$$

$$F_{1/2} = 0,5 (F_{min1/2} + F_{max1/2}); \quad (12)$$

$$F_1 = 0,5 (F_{min1} + F_{max1}); \quad (13)$$

$$F_{3/2} = 0,5 (F_{min3/2} + F_{max3/2}); \quad (14)$$

Отсюда средние расчетные значения интегральных параметров и минимальный и максимальный уровни деформации шероховатого слоя равны:  $F_0 = 7,604 \cdot 10^{-3}$ ;  $F_{1/2} = 3,509 \cdot 10^{-3}$ ;  $F_1 = 2,251 \cdot 10^{-3}$ ;  $F_{3/2} = 1,5965 \cdot 10^{-3}$ ;  $h_{min} = 3,3$ ;  $h_{max} = 3,5$ .

Исходя из значения  $h_{min}$  и  $h_{max}$  по представленным ниже формулам производится расчет сближения поверхностей (15) – (16), среднего числа пятен (17), среднего диаметра пятна контакта (18), среднего радиуса контактного пятна (19), площади контактного пятна (20), сопротивления покрытия контактного пятна (21), контактного электрического сопротивления (22).

$$\delta_{min} = \frac{R_{max}}{2} - \sigma \cdot h_{min} \quad (15)$$

$$\delta_{max} = \frac{R_{max}}{2} - \sigma \cdot h_{max} \quad (16)$$

$$N_c = A_a \cdot 10^6 \cdot D' \cdot F_0 \quad (17)$$

$$d = 2 \cdot \left( \frac{\sqrt{2} \cdot \sigma \cdot R \cdot F_1}{F_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$\mathcal{R} = \frac{d}{2} \quad (19)$$

$$S = \pi \cdot \mathcal{R}^2 \quad (20)$$

$$R_t = \frac{\rho_f \cdot d_f}{\pi \cdot \mathcal{R}^2}, \quad (21)$$

$$R_c = \frac{\rho}{2 \cdot \mathcal{R}} \cdot \frac{S}{A_r} + R_t,$$

где  $\rho_f = 10^8$  Ом – удельное сопротивление смазки; (22)

$d_f = 10 \cdot 10^{-6}$  м – толщина смазочной пленки;

$\rho = 0,137$  – удельное сопротивление стали.

При этом параметры, определяемые по выражениям (15) – (18), примут значения:

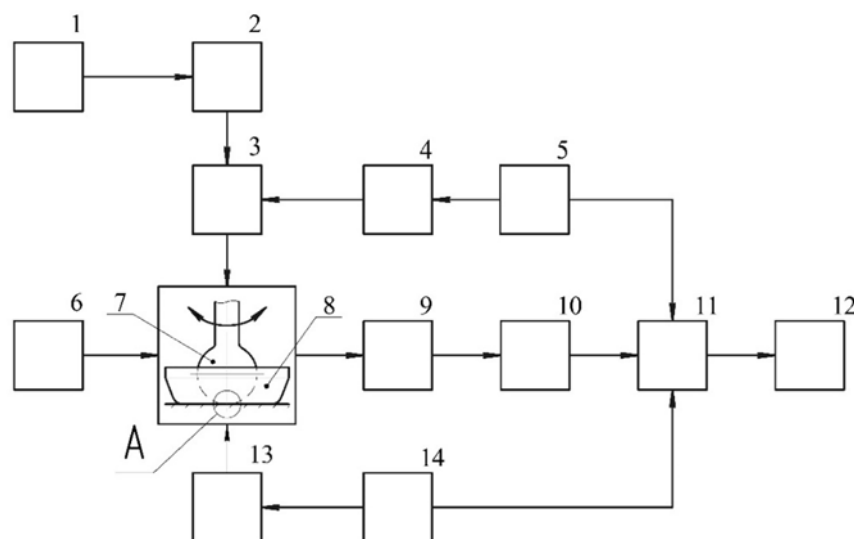
$\delta_{min} = -0,379$  мкм;  $\delta_{max} = -0,499$  мкм;  $N_c = 129,536$ ;  $d = 19,475$  мкм.

Для экспериментального подтверждения правомерности разработанной математической модели, а также изучения процессов, происходящих в зоне трения эндопротеза, разработано экспериментальное оборудование, обеспечивающее заданное перемещение, характер нагружения эндопротеза, а также мониторинг его электрического сопротивления. В основу заложен программно–аппаратный комплекс, обеспечивающий технические характеристики, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики программно–аппаратного комплекса

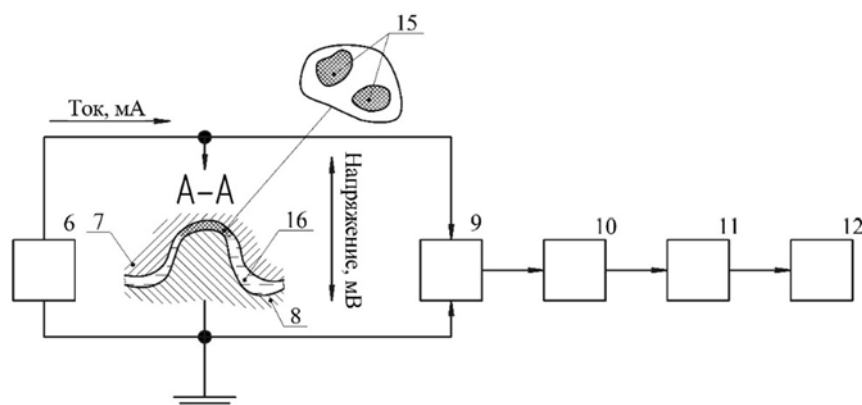
Параметр	Значение
Предельная нагрузка, Н	1000
Максимальная частота вращения привода, (об/мин)	2600
Аналоговый выход, В	0... 3,3
Диапазон измерения напряжения, В	0... 5
Полоса пропускания сигнала, МГц	10
Диагностический ток, мА	0,5... 2

Состав программно–аппаратного комплекса поясняется функциональной схемой, представленной на рисунке 3, а функциональная схема электрического канала для измерения сопротивления пары трения типа «металл–металл» эндопротеза показана на рисунке 4.



**Рисунок 3 – Функциональная схема комплекса:**

1 – воздушный компрессор; 2 – нагрузочный адаптер; 3 – первичный адаптер;  
4 – двигатель; 5 – датчик положения угла поворота; 6 – источник тока;  
7 – головка; 8 – чашка; 9 – инструментальный усилитель; 10 – АЦП;  
11 – интерфейс; 12 – ЭВМ; 13 – опорная плита; 14 – датчик силы



**Рисунок 4 – Функциональная схема канала измерения:**

15 – пятна контакта; 16 – смазочный слой

Программно–аппаратный комплекс работает следующим образом. Воздушный компрессор 1 через нагрузочный адаптер 2 создает нормированное значение силы, отслеживаемое датчиком 14 силы, расположенного под опорной плитой 13, действующее на первичный адаптер 3, который передает нагрузку на головку 7, совершая вращение под заданным углом от двигателя 4, регистрируемое датчиком положения угла поворота 5. Диагностический постоянный ток с источника тока 6 преобразуется в напряжение на изменяющемся электрическом активном сопротивлении трибосопряжения с парой трения «металл–металл» головки 7 и чашки 8, закрепленной в опорной плите 13, которое поступает на инструментальный усилитель 9 для увеличения амплитуды электрического сигнала до входного уровня АЦП 10. Сигналы с датчика положения угла поворота 5, АЦП 10 и датчика силы 14 поступают на интерфейс 11 для последующей передачи, обработки и визуализации на ЭВМ 12.

Принцип действия электрического канала измерения программно–аппаратного комплекса (рисунок 4) заключается в пропускании через трибосопряжение с парой трения «металл–металл» стабилизированного диагностического тока с нормируемым значением  $I = 0,5 \dots 2$  мА и последующем измерении падения напряжения на паре трения при изменении сопротивления нагрузки (диапазон до 4 кОм). Нагрузкой источника тока 6 являются головка 7, чашка 8, пятна контакта 15 и смазочный слой 16. Источник тока 6

поддерживает стабильный постоянный ток при изменении сопротивления нагрузки с частотой до 15 МГц [11]. Усиления сигнала сопротивления производится с помощью инструментального усилителя 9. При этом источник тока 6, трибосопряжение с парой трения «металл–металл» и инструментальный усилитель 9 заземлены и экранированы с целью улучшения помехозащищенности информативного сигнала, который поступает с выхода инструментального усилителя 9 на АЦП 10, формирующий цифровой код, соответствующий значению информативного сигнала эквивалентному сопротивлению трибосопряжения с парой трения «металл–металл», и передающий его через интерфейс 11 на ЭВМ 12 [12–14].

*Алгоритм работы программной части комплекса.*

Системы сбора данных являются узкоспециализированным программным обеспечением. Можно выделить следующие главные задачи разрабатываемой системы:

- идентификация устройства сбора и программного обеспечения;
- передача данных, собранных по заданным параметрам, для последующей их обработки.

Реализацию данных задач следует в полной мере отразить на этапе проектирования. Одним из вариантов такого решения может служить диаграмма потока данных, представленная на рисунке 5. Данная диаграмма демонстрирует взаимодействие разрабатываемой информационной системы с внешней средой и показывает логические функции и перемещение данных между ними. Информационная система сбора данных имеет два интерфейса: интерфейс взаимодействия и интерфейс подключения датчиков. Первый требуется для взаимодействия с пользователем, а второй — для сбора оцифрованных показателей датчиков. Для системы сбора данных достаточно два вида команд, соответствующих представленным задачам. В силу этого в результате обработки либо инициализируется процесс вывода идентифицирующей информации о программе, либо на основе параметров, содержащихся в команде, осуществляется сбор данных. Последнее обеспечивается формированием сообщения через одинаковые промежутки времени, отвечающие заданной частоте. Готовые сообщения накапливаются в буфере до достижения определенного размера, обеспечивающего оптимальную пропускную способность интерфейса взаимодействия. Поскольку требуется обеспечить одинаковую периодичность вызова функции формирования сообщения, а выполнение отправки пакета сообщений может занять значительно большее времени, чем позволяет заданная частота сбора применяется концепция двойной буферизации. При достаточном заполнении буфера происходит переключение на другой буфер, после чего можно приступить к отправке исходного. Такой подход обеспечивает исключение проблем, связанных с потерей пакетов данных.

Асинхронность работы возникает не только при сборе данных, но и со стороны интерфейса взаимодействия с пользователем. Команды могут поступать во время выполнения системой иных задач. Данное обстоятельство приводит к формированию состояний системы, наглядно продемонстрированных на рисунке 6.

Система после запуска попадает в состояние 1 — прием команд. В этом состоянии обеспечивается интерактивная составляющая разрабатываемого программного продукта. Команда идентификации не приводит к изменению состояния, поскольку данная команда является в общем случае линейной.

При получении запроса на выполнение сбора данных происходит переход в состояние 2 — инициализация процесса получения показателей. Оно предназначается для установки начальных значений всех компонентов, задействованных в процессе сбора.

По завершению инициализации происходит безусловный переход в состояние 3 — формирование сообщения. Дальнейший переход возможен в два состояния в зависимости от выполнения условий. Система может перейти в состояние 4 только, если активный буфер сообщений достаточно заполнен или данное сообщение является последним. При завершении процесса сбора данных обеспечивается переключение в состояние приема пользовательских команд. Последним из представленных состояний является состояние 4 — отправка пакета сообщений. В зависимости от аппаратной реализации интерфейса взаимодействия с пользователем отправка данных может осуществляться асимметрично. В таком случае время нахождения системы в состоянии будет строго фиксировано, и будет затрачиваться только на инициализацию процесса.

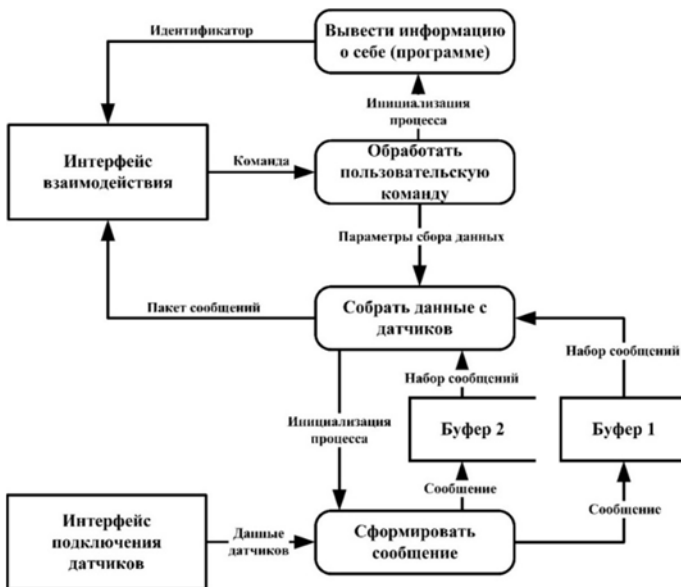


Рисунок 5 – Диаграмма потока данных



Рисунок 6 – Диаграмма переходов состояний

На рисунке 7 показаны характерные графические зависимости, отображающие сигналы, получаемые с 3-х синхронизированных между собой по времени каналов измерений программно-аппаратного комплекса при проведении экспериментальных исследований, а также теоретическая зависимость электрического сопротивления, рассчитанная с помощью математической модели (рисунок 7, в). Приведенные данные информируют, как о процессах, протекающих в зоне контакта трибосопряжения с парой трения «металл-металл», так и о ходе испытания тестируемого образца.

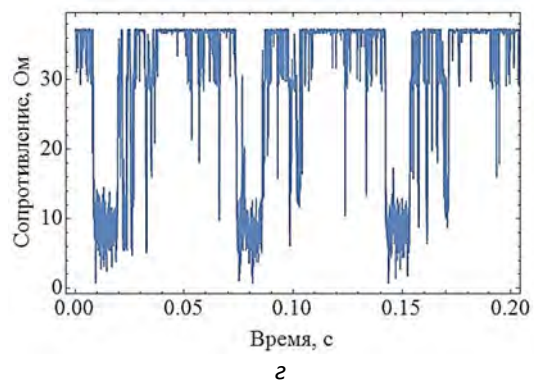
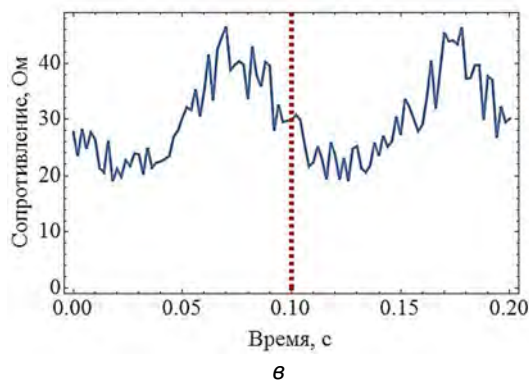
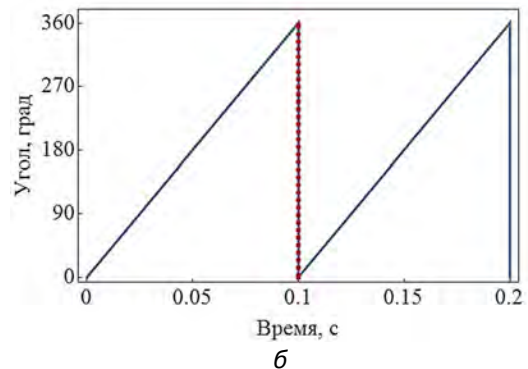
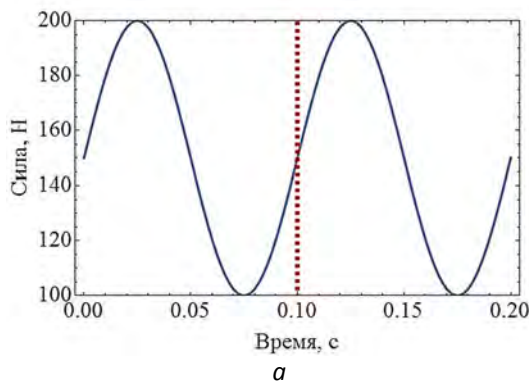


Рисунок 7 – Графические зависимости изменения:

- а) силы нагрузки от времени; б) угла поворота от времени головки эндопротеза;  
в) сопротивления от времени, рассчитанного с помощью математической модели; г) сопротивления от времени, полученного в ходе испытания эндопротеза с парой трения «металл-металл»

Сравнивая результат, полученный в ходе теоретических исследований на математической модели и типовой сигнал, полученный с программно–аппаратного комплекса для испытания эндопротезов тазобедренных суставов с парой трения «металл–металл», можно сделать вывод о том, что общее сопротивление типового сигнала, полученного с программно–аппаратного комплекса сопоставимо расчетному сопротивлению пары трения по математической модели электрического контактирования 2–х сферических поверхностей эндопротеза. Это подтверждается средними значениями общего сопротивления, рассчитанного в математической модели  $R_c^m = 26,7 \text{ Ом}$  и полученного типового сигнала  $R_s^m = 29,48 \text{ Ом}$ . Результаты исследований сопоставимы с ранее полученными авторами в работах [14–16] для аналогичных трибообъектов, что подтверждает правильность основных подходов в моделировании и проектировании экспериментального оборудования.

#### Заключение.

1. Разработана математическая модель, позволяющая оценить уровень электрического сопротивления трибосопряжений головки и чашки эндопротеза с учетом его реальной и моделируемой макро и микрогеометрии, режимов работы.
2. Разработаны: программно–аппаратный комплекс для испытаний эндопротеза с парой трения «металл–металл» с высокочастотной системой сбора данных и алгоритмами обработки пользовательских команд и сбора показателей с датчиков, реализованный 3–мя измерительными каналами, регистрирующими нагрузку, угол поворота головки эндопротеза и электрическое сопротивление трибоузла, синхронизированными между собой по времени.
3. Получены типовой экспериментальный сигнал сопротивления с испытываемого образца эндопротеза и эквивалентный сигнал, рассчитанный с помощью математического моделирования, сравнение средних значений которых свидетельствует об адекватности теоретических и практических исследованиях характеристик контакта 2–х сферических поверхностей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. McNie, C. The Effect of Radial Clearance On Lubrication in a Metal on Metal joint tested in a Hip Joint Simulator / C. McNie, D. Dowson // *Thinning Films and Tribological Interfaces*. – 2000. – pp. 341–345.
2. Whitby, R. David. Tribological problems with medical implants / R. David Whitby // *Worldwide. Tribology & Lubrication technology*. – 2011. – № 1.
3. Вавилов, В.П. Неразрушающий контроль / В.П. Вавилов, К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачев, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужикский. Справочник в 8 томах/ Под общей редакцией В.В. Клюева. М.: Машиностроение. – 2006. – Т. 5. – Кн. 1. Тепловой контроль. Книга 2. Электрический контроль (2–е издание, исправленное).
4. Пахолкин, Е.В. Приборы для трибомониторинга / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // *Датчики и системы*. – 2008. – № 3. – С. 16–19.
5. Подмастерьев, К.В. Электрический метод и средства поиска локальных дефектов опор качения / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин // *Дефектоскопия*. – 1998. – № 8. – С. 59–67.
6. Некрасов, В.И. Метод и средство диагностирования эндопротезов суставов с парой трения металл–металл на стадии производства / В.И. Некрасов, В.В. Мишин, А.В. Жидков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 6 (302). – С. 117–123.
7. Некрасов, В.И. Математическое моделирование процессов, протекающих в эндопротезе сустава / В.И. Некрасов, В.В. Мишин, А.С. Пашментова, Л.Н. Скозарь // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XI–ой Международной научно–практической конференции: в 4–х томах*. Курск. – 2014. – С. 147–152.
8. Левыкин, Д.А. Математическая модель электрического контакта шероховатых поверхностей / Д.А. Левыкин // *Программные продукты и системы*. – 2011. – № 4. – С. 178–180.
9. Свириденко, А.И. Механика дискретного фрикционного контакта / А.И. Свириденко, С.А. Чижик, М.И. Петроковец. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 272 с.
10. Жидков, А.В. Однополярный источник тока с имитатором сопротивления для измерительного канала лабораторного стенда для испытаний эндопротеза тазобедренного сустава / А.В. Жидков, М.П. Жильцов, А.С. Пашментова, В.В. Мишин // *Фундаментальные и прикладные аспекты создания биосферосовместимых систем. Материалы 2–й международной научно–технической интернет–конференции*. – 2014. – С. 351–355.
11. Жидков, А.В. Блок усиления и фильтрации электрического сигнала пары трения эндопротеза при трибоиспытаниях / А.В. Жидков, М.П. Жильцов, И.В. Павлюченко // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: XII–я Международная научно–практическая конференция 19–20 марта 2015 года*. – 2015. – Т. 2. – С. 95–99.

12. Жидков, А.В. Экспериментальные исследования электрических параметров процессов в зоне трения сферической детали / А.В. Жидков, М.П. Жильцов, А.С. Пашментова, И.В. Павлюченко, Л.С. Бобернага // Международная научно-техническая интернет-конференция ИСИТ 2015 «Информационные системы и технологии» – 2005.

13. Мишин, В.В. Приборная база для комплексного диагностирования подшипников / В.В. Мишин, К.В. Подмастерьев, В.В. Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4. – С. 111–120.

14. Селихов, А.В. Экспериментальное исследование электрического сопротивления (проводимости) подшипника качения как диагностического параметра / А.В. Селихов, В.В. Мишин, М.В. Майоров, А.А. Катыхин, К.В. Шаталов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 6–2. – С. 25.

15. Мишин, В.В. Метод и средства диагностирования подшипниковых узлов с учетом макрогеометрии дорожек качения / В.В. Мишин. – автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Орел, 2000.

16. Подмастерьев, К.В. Диагностический комплекс для трибологических исследований электрофлуктуационными методами / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, В.В. Мишин, В.В.Марков // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 12.

**Жидков Алексей Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл  
Аспирант кафедры ЭВТИБ  
Тел.: +79536222332  
E-mail: alexeyzhidkov54@yandex.ru

**Жильцов Михаил Петрович**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл  
Аспирант кафедры ЭВТИБ  
Тел.: +79536291236  
E-mail: mik2015zh@yandex.ru

**Лупандин Александр Александрович**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл  
Аспирант кафедры ИС  
Тел.: +79208097410  
E-mail: shurik@student.su

**Вьюн Сергей Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл  
Магистрант кафедры ПМиС  
Тел.: +79202842832  
E-mail: bozmankiev@mail.ru

**Лобода Ольга Александровна**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл  
Старший преподаватель  
кафедры ЭВТИБ  
Тел.: +79616226530  
E-mail: loboda.o@mail.ru

**Мишин Владислав Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл  
Кандидат технических наук, доцент,  
зав. каф. ЭВТИБ  
Тел.: +79536133879  
E-mail: vlad89290@gmail.com

**Подмастерьев Константин Валентинович**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл  
Доктор технических наук, профессор, зав. каф. ПМиС  
Тел.: (4862)41–98–03  
E-mail: asms-orel@mail.ru

A.V. ZHIDKOV, M.P. ZHILTSOV, A.A. LUPANDIN, S.S. VYUN,  
O.A. LOBODA, V.V. MISHIN, K.V. PODMASTERYEV

## HARDWARE–SOFTWARE COMPLEX FOR TEST HIP JOINT WITH FRICTION PAIR «METAL–METAL»

*The article describes the mathematical model of resistance changes under the influence of external floating load, the structure and operation of hardware and software for experimental studies of the parameters of the processes occurring in the contact area of the endoprosthesis with a pair of friction «metal–metal», as well as the algorithm of data acquisition system. Hardware–software complex for studying the processes occurring in the implant friction node (during the test) in operating conditions close to reality. Its use allows testing of interacting spherical surfaces, based on the theoretical study of the mathematical model of the electrical resistance functioning hip endoprosthesis with a pair of friction «metal–metal».*

**Keywords:** tribodiagnostics, tribomonitoring, testing, boundary layers, spherical surfaces, test devices, lubrication, electroresistive method, friction, tribocoupling, wear, device.

## BIBLIOGRAPHY

1. McNie, C. The Effect of Radial Clearance On Lubrication in a Metal on Metal joint tested in a Hip Joint Simulator / C. McNie, D. Dowson // Thinning Films and Tribological Interfaces. – 2000. – pp. 341–345.
2. Whitby, R. David. Tribological problems with medical implants / R. David Whitby // Worldwide. Tribology & Lubrication technology. – 2011. – № 1.
3. Vavilov, V.P. Nerazrushayushchiy kontrol / V.P. Vavilov, K.V. Podmasteryev, F.R. Sosnin, S.F. Korndorf, T.I. Nogachev, Ye.V. Pakholkin, L.A. Bondareva, V.F. Muzhitskiy. Spravochnik v 8 tomakh/ Pod obshchey redaktsiyey V.V. Klyuyeva. M.: Mashinostroyeniye. – 2006. – T. 5. – Kn. 1. Teplovoy kontrol. Kniga 2. Elektricheskiy kontrol (2–ye izdaniye, ispravlennoye).

4. Pakholkin, Ye.V. Pribory dlya tribomonitoringa / Ye.V. Pakholkin, K.V. Podmasteryev // Datchiki i sistemy. – 2008. – № 3. – S. 16–19.
5. Podmasteryev, K.V. Elektricheskiy metod i sredstva poiskka lokalnykh defektov oror kacheniya / K.V. Podmasteryev, Ye.V. Pakholkin // Defektoskopiya. – 1998. – № 8. – S. 59–67.
6. Nekrasov, V.I. Metod i sredstvo diagnostirovaniya endoprotezov sustavov s paroy treniya metall–metall na stadii proizvodstva / V.I. Nekrasov, V.V. Mishin, A.V. Zhidkov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2013. – № 6 (302). – S. 117–123.
7. Nekrasov, V.I. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov, protekayushchikh v endoproteze sustava / V.I. Nekrasov, V.V. Mishin, A.S. Pashmentova, L.N. Skosar // Sovremennyye instrumentalnyye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii: sbornik nauchnykh trudov XI–oy Mezhdunarodnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii: v 4–kh tomakh. Kursk. – 2014. – S. 147–152.
8. Levykin, D.A. Matematicheskaya model elektricheskogo kontakta sherokhovatykh poverkhnostey / D.A. Levykin // Programmnyye produkty i sistemy. – 2011. – № 4. – S. 178–180.
9. Sviridenok, A.I. Mekhanika diskretnogo friksionnogo kontakta / A.I. Sviridenok, S.A. Chizhik, M.I. Petrokovets. – Minsk: Navuka i tekhnika, 1990. – 272 s.
10. Zhidkov, A.V. Odnopolyarnyy istochnik toka s imitatorom soprotivleniya dlya izmeritelnogo kanala laboratornogo stenda dlya ispytaniy endoproteza tazobedrennogo sustava / A.V. Zhidkov, M.P. Zhiltsov, A.S. Pashmentova, V.V. Mishin // Fundamentalnyye i prikladnyye aspekty sozdaniya biosferosovmestimyykh sistem. Materialy 2–y mezhdunarodnoy nauchno–tekhnicheskoy internet–konferentsii. – 2014. – S. 351–355.
11. Zhidkov, A.V. Blok usileniya i filtratsii elektricheskogo signala pary treniya endoproteza pri triboispytaniyakh / A.V. Zhidkov, M.P. Zhiltsov, I.V. Pavlyuchenko // Sovremennyye instrumentalnyye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii: XII–ya Mezhdunarodnaya nauchno–prakticheskaya konferentsiya 19–20 marta 2015 goda. – 2015. – T. 2. – S. 95–99.
12. Zhidkov, A.V. Eksperimentalnyye issledovaniya elektricheskikh parametrov protsessov v zone treniya sfericheskoy detali // A.V. Zhidkov, M.P. Zhiltsov, A.S. Pashmentova, I.V. Pavlyuchenko, L.S. Bobernaga // Mezhdunarodnaya nauchno–tekhnicheskaya internet–konferentsiya ISIT 2015 «Informatsionnyye sistemy i tekhnologii» – 2005.
13. Mishin, V.V. Pribornaya baza dlya kompleksnogo diagnostirovaniya podshipnikov / V.V. Mishin, K.V. Podmasteryev, V.V. Markov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2011. – № 4. – S. 111–120.
14. Selikhov, A.V. Eksperimentalnoye issledovaniye elektricheskogo soprotivleniya (provodimosti) podshipnika kacheniya kak diagnosticheskogo parametra // A.V. Selikhov, V.V. Mishin, M.V. Mayorov, A.A. Katykhin, K.V. Shatalov // Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2010. – № 6–2. – S. 25.
15. Mishin, V.V. Metod i sredstva diagnostirovaniya podshipnikovyykh uzlov s uchetom makrogeometrii dorozhek kacheniya / V.V. Mishin. – avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Orel, 2000.
16. Podmasteryev, K.V. Diagnosticheskiy kompleks dlya tribologicheskikh issledovaniy elektrofuktuatsionnymi metodami // K.V. Podmasteryev, Ye.V. Pakholkin, V.V. Mishin, V.V. Markov // Kontrol. Diagnostika. – 2000. – № 12.

**Zhidkov Alexey Vladimirovich**  
State University PSU, Orel  
Postgraduate at the Department of  
ECEIS  
Ph.: +79536222332  
E-mail: alexeyzhidkov54@yandex.ru

**Zhiltsov Mihail Petrovich**  
State University PSU, Orel  
Postgraduate at the Department of  
ECEIS  
Ph.: +79536291236  
E-mail: mik2015zh@yandex.ru

**Lupandin Aleksandr Aleksandrovich**  
State University PSU, Orel  
Postgraduate at the Department of IT  
Ph.: +79208097410  
E-mail: shurik@student.su

**Viun Sergei Sergeevich**  
State University PSU, Orel  
Ph.: +79202842832  
E-mail: bozmankiev@mail.ru

**Loboda Olga Aleksandrovna**  
State University PSU, Orel  
PhD, professor  
Senior Lecturer at the Department  
of ECEIS  
Ph.: +79616226530  
E-mail: loboda.o@mail.ru

**Mishin Vladislav Vladimirovich**  
State University PSU, Orel  
PhD, docent  
Ph.: +79536133879  
E-mail: vlad89290@gmail.com

**Podmasteryev Konstantin Valentinovich**  
State University PSU, Orel  
Doctor of Technical Sciences, professor,  
Head. Department of «Testing, Metrology and Certification»  
Ph.: (4862)41–98–03  
E-mail: asms-orel@mail.ru



УДК 76.35.41

Н.А. КОРЕНЕВСКИЙ, М.А. МАГЕРОВСКИЙ, А.Н. ШУТКИН, В.И. ФЕДЯНИН

## НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ И ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОДГОТОВКИ СПОРТСМЕНОВ

*Рассматриваются математические модели принятия решений о выборе направлений спортивной подготовки и оценки уровня подготовленности спортсменов к спортивным состязаниям различного уровня с использованием нечеткой логики.*

**Ключевые слова:** профессиональная ориентация, уровень спортивной подготовки, нечеткая логика принятия решений.

В современной спортивной практике наиболее популярными методами используемыми для профессионального отбора, оценки степени тренированности, готовности к достижению тех или иных спортивных результатов, включая высшие, являются методы, основанные на оценке функционального состояния (ФС) и функциональных резервов (ФР) человека, которые измеряются с использованием различных психофизиологических методик и сопоставляются со спортивными возможностями испытуемых [2, 10, 11]. При этом различные группы исследователей и тренеров используют различные подходы к оценке и трактовке результатов анализа ФС и ФР, что делает практически несопоставимыми различные подходы к проблеме профессиональной ориентации и определения уровня подготовки к различным соревнованиям. Кроме того, с математической точки зрения понятия ФС и ФР не могут быть описаны строгими формальными моделями и, более того, часто большая доля неопределенности содержится в исходных признаках, используемых для их оценки [1, 3, 12–15].

В этих условиях, согласно рекомендациям [4–8, 16], наиболее адекватным является математический аппарат, основанный на технологии мягких вычислений и в частности теория нечеткой логики принятия решений [3, 10].

В работах [3, 5, 9, 13–15] показано, как используя теорию нечеткой логики принятия решений синтезировать решающие правила количественной оценки ФС и ФР и как синтезировать математические модели для решения различных видов задач прогнозирования и классификации состояния биообъектов, в которых существенную роль играют параметры, связанные с функциональным состоянием и резервом.

Разведочный анализ по структуре данных, выбираемых экспертами для моделей количественной оценки уровней ФР и ФС и зависящих от их моделей выбора будущей спортивной деятельности и уровня спортивной готовности, показал, что как состав информативных показателей, так и геометрическая структура исследуемых классов состояний существенно неоднородны с плохоопределяемыми границами. В таких условиях среди множества методов синтеза нечетких решающих правил выбрана методология синтеза гетерогенных нечетких математических моделей, разработанная на кафедре биомедицинской инженерии ЮЗГУ [4, 6–8, 16] применительно к решаемым в работе задачам.

Основные этапы этого синтеза формулируются следующим образом:

1. Если на экспертном уровне и в ходе разведочного анализа выясняется возможность формирования признакового пространства или подпространства, где каждый из признаков  $x_i$  представим системой  $k$  градаций  $x_{ik}$  и существует возможность произвести статистический расчёт частот появления  $k$ -ой градации  $i$ -го признака в альтернативных классах  $\omega_\ell$  и  $\omega_r$  –  $P(x_{ik} / \omega_\ell)$ ,  $P(x_{ik} / \omega_r)$ , то изучается целесообразность использования секвенциальной последовательной процедуры А. Вальда с расчетом диагностического коэффициента по формуле:

$$DK = \sum_{i=1}^n 10 \lg \frac{P(x_{ik} / \omega_\ell)}{P(x_{ik} / \omega_r)}, \quad (1)$$

где  $\omega_\ell$  и  $\omega_r$  – пара альтернативных классов состояний;

$x_{ik}$  – значение  $k$ -ой градации информативного признака  $x_i$ , ( $i = 1, \dots, n$ );

$n$  – размерность пространства признаков;

$P(x_{ik} / \omega_\ell)$  – частота появления  $k$ -ой градации  $i$ -го признака в классе  $\omega_\ell$ ;

$P(x_{ik} / \omega_r)$  – в классе  $\omega_r$ .

При переходе к нечёткому Вальдовскому классификатору уверенность в классификации  $\omega_\ell$  –  $UGV_\ell$  определяется функцией принадлежности к  $\omega_\ell$  с базовой переменной определяемой по шкале ДК [4].

2. Если при анализе структуры многомерных данных в двумерном классификационном пространстве  $\Phi = Y_1 \times Y_2$  ( $Y_1 = F_1(A, X)$ ,  $Y_2 = F_2(B, X)$ ,  $A$  и  $B$  – вектора настраиваемых параметров,  $X$  – вектор в пространстве информативных признаков) находятся границы разделяемых классов состояний  $\omega_\ell$  и  $\omega_r$ ,  $G_{lr} = F_{lr}(Y_1, Y_2)$  с приемлемым качеством классификации, то нечеткое решение может быть принято в соответствии с выражением:

$$UGD_\ell = \mu_{\omega_\ell}(D_\ell), \quad (2)$$

где  $D_\ell$  – базовая переменная, определяемая до границ разделяемых классов;

$UGD_\ell$  – уверенность в классификации по классу  $\omega_\ell$ .

3. При использовании модификаций классического аппарата нечеткой логики принятия решений Л. Заде, ориентированной на решение классификационных задач в качестве базовых элементов используются функции принадлежности  $\mu_{\omega_\ell}(x_i)$  и (или)  $\mu_{\omega_\ell}(Y_j)$  к исследуемым классам состояний  $\omega_\ell$  с базовыми переменными, определяемыми по шкалам информативных признаков  $x_i$  и (или) комплексных показателей  $Y_j$ , вычисляемых по информативным показателям  $Y_j = f_j(x_1, x_2, \dots)$ , где  $f_j$  функциональная зависимость, «связывающая» все или часть информативных признаков с  $Y_j$  [4–8].

Наиболее популярными формулами агрегации при использовании функций принадлежности являются выражения вида:

$$UGN_\ell = \min[\mu_{\omega_\ell}(x_i)], \quad UGN_\ell = \max[\mu_{\omega_\ell}(x_i)], \quad UGN_\ell = \max_q \min_i[\mu_{\omega_\ell q}(x_i)], \quad (3)$$

Последнее выражение позволяет аппроксимировать многомерные объемы любой сложности нечеткими гиперпараллелепипедами.

4. Если группа или все информативные признаки  $x_i$  или комплексные показатели  $Y_j$  таковы, что каждый из них увеличивает уверенность в гипотезе  $\omega_\ell$ , то частную и (или) общую уверенность  $UGS_\ell$  в  $\omega_\ell$  рекомендуется определять по модифицированным формулам Е. Шортлифа [4, 5, 8, 16].

$$UGS_\ell(p+1) = UGS_\ell(p) + \mu_{\omega_\ell}(x_i)[1 - UGS_\ell(p)], \quad (4)$$

$$UGS_\ell(p+1) = UGS_\ell(p) + \mu_{\omega_\ell}(Y_j)[1 - UGS_\ell(p)], \quad (5)$$

$$UGS_\ell(p+1) = UGS_\ell(p) + US_\ell(p+1) \cdot [1 - UGS_\ell(p)], \quad (6)$$

где  $p$  – номер итерации в расчете  $UGS_\ell$ ;

$US_\ell(p+1)$  – частная уверенность в  $\omega_\ell$  по подпространству с номером  $p+1$  многомерного пространства признаков.

5. Если в качестве информативных признаков используются электрические характеристики биологически активных точек (БАТ), например их электрические сопротивления, то с учетом биофизики этих точек и специфики выводимой на них информации в работах [5, 13] рекомендуется использовать гибридное правило принятия решений, состоящее из четкого условия и правила нечеткого принятия решений вида:

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ} (Y_{j\ell} \forall [ДЗТ]_\ell \delta R_j \geq \delta R_j^{nop}), \text{ ТО} \\ &\{UGB_\ell(j+1) = UGB_\ell(j) + \mu_{\omega_\ell}(\delta R_{j+1})[1 - UGB_\ell(j)]\} \\ &\text{ИНАЧЕ} (UGB_\ell = 0), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $Y_{j\ell}$  – список информативных точек по заболеванию  $\omega_\ell$ ;

$\forall$  – квантор общности;

$[ДЗТ]_\ell$  – список диагностически значимых точек, анализ которых позволяет из множества информации, «выводимой» на БАТ выделить искомое состояние обследуемого;

$\delta R_j$  – относительное отклонение сопротивления БАТ с номером  $j$  от своего номинального значения;

$\delta R_j^{nop}$  – пороговое значение  $\delta R_j$ , определяемое в ходе синтеза решающих правил;

$\mu_{\omega\epsilon}(\delta R_{j+1})$  – функция принадлежности к классу  $\Omega_\ell$  с базовой переменной  $\delta R_{j+1}$ ;

$UGB_\ell$  – уверенность в диагнозе  $\Omega_\ell$ ;  $UGB_\ell(1) = \mu_{\omega\epsilon}(\delta R_1)$ .

Подробнее механизм синтеза приведенных нечетких решающих правил и механизмы их агрегации описаны в работах [4, 6–8, 16].

В работах [3, 9, 12–15] показано как используя нечеткие решающие правила (1), ..., (7) решать задачи оценки функционального состояния и функционального резерва в интересах медицины и психологии.

Для работы со спортсменами, с учетом [3, 9, 12, 13], в рамках поставленных в работе задач, уровни функционального состояния UFS и резерва UFR будем определять выражениями:

$$UFS = F_s(PV, ER, TO, AP); \quad (8)$$

$$UFR = UFS_o / UFS_p, \quad (9)$$

где UFS – уровень функционального состояния, определяемый как степень готовности к совершению заданного вида деятельности;

$F_s$  – нечеткий агрегатор, определяемый итерационной формулой Е. Шортлифа;

PV – показатели, характеризующие состояние внимания человека, определяемые с помощью аппаратуры описанной в работе [13];

ER – величина энергетического разбаланса меридианных структур, определяемая по методике, описанной в работе [5];

TO – результаты тестового опроса по функциональному состоянию определяемые по методикам работы [13];

AP – величина адаптационного потенциала организма по Р.М. Баевскому [1];

UFR – уровень функционального резерва;

$UFS_o$  – уровень функционального состояния до нагрузки;

$UFS_p$  – уровень функционального состояния после нагрузки (велозергометр).

Методика определения UFS и конкретные математические модели для его вычисления приведены в работах [12, 13]. Методика определения UFR и конкретные математические модели для его вычисления приведены в работе [9].

Нечеткую модель оценки степени пригодности к спортивной профессии с номером  $\ell$  определим выражением:

$$SP_\ell = F_{SP_\ell}(UFS, UFR), \quad (10)$$

где  $F_{SP_\ell}$  – функция агрегации для модели оценки профессиональной пригодности к виду спорта  $\ell$ .

Нечеткую модель уровня подготовки спортсмена по виду спорта с номером  $r$  определим выражением:

$$UP_r = F_{UP_r}(UFS, UFR), \quad (11)$$

где  $F_{UP_r}$  – соответствующая функция агрегации.

В данной работе осуществляется поиск моделей для оценки уровня подготовки студентов к занятию спортом (модель 11).

Составляющие UFS и UFR имеют нечеткую природу и измеряются на непрерывных шкалах в интервале [0,1]. Большому значению UFS и UFR соответствуют большие уровни подготовки спортсменов.

При таких исходных данных в соответствии с рекомендациями [3–10] целесообразно проверить качество работы двух типов агрегаторов: по Е. Шортлифу (модель 6) и нечеткий классификатор в двумерном пространстве с координатами {UFS, UFR} (модель 2).

Модель Е. Шортлифа имеет вид:

$$UP_r = UFS + UFR(1 - UFS), \quad (12)$$

В соответствии с этой моделью  $UP_r$  измеряется по шкале [0,1]. Большому значению  $UP_r$  соответствует больший уровень подготовки спортсмена. Для практического использования шкалы  $UP_r$  экспертам–тренерам было предложено выделить несколько уровней подготовки. В результате работы экспертов по методу Делфи были выделены

следующие классы: не удовлетворительный –  $\omega_H$ ; удовлетворительный –  $\omega_Y$ ; хороший –  $\omega_X$  отличный –  $\omega_O$  уровни спортивной подготовки.

По этим классам, с использованием информации о спортивных достижениях студентов Юго-Западного государственного университета и Воронежского института государственной противопожарной службы, были выделены 4 группы студентов с расчетом показателя  $UP_r$ .

Далее по шкале  $UP_r$  были построены гистограммы  $h_{\omega_r}(UP_r)$  распределения студентов по классам  $\omega_H, \omega_Y, \omega_X$  и  $\omega_O$  (рисунок 1).

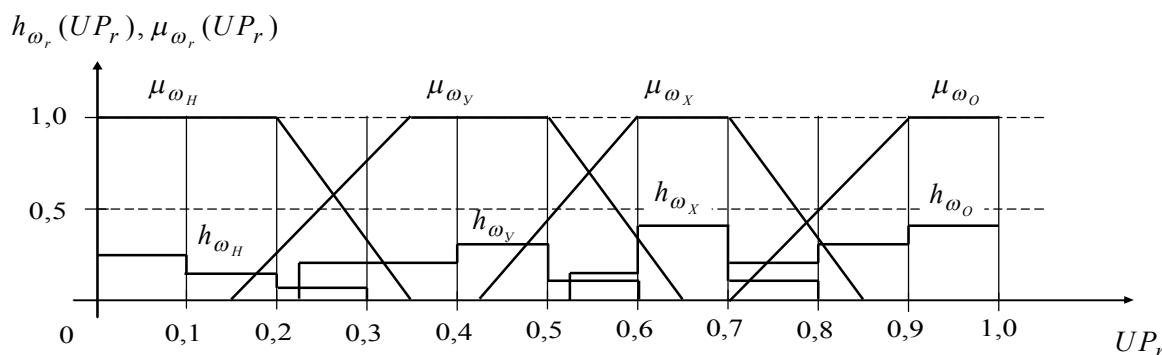


Рисунок 1 – Графики гистограмм распределений и функций принадлежности к классам  $\omega_r (r = H, Y, X, O)$

В соответствии с рекомендациями [4] по этим гистограммам были построены функции принадлежности к классам уровней спортивной подготовки  $\mu_{\omega_r}(UP_r)$ .

Конкретная классификация осуществляется по максимальному значению  $\mu_{\omega_r}(UP_r)$ .

В двумерном пространстве признаков распределение классов  $\omega_r$  имеет вид, представленный на рисунке 2.

Анализ конфигурации классов  $\omega_r$  приведенных на рисунке 2 показывает, что показатель  $UFR$  играет несколько большую роль в оценке успешности спортсменов, чем показатель  $UFS$ . Экспертным опросом было установлено, что уровень доверия к модели (12) составляет 0,85, а к классификационной диаграмме модель рисунке 2 – 0,9. В то же время оценка уровня спортивной подготовки отдельно по каждому показателю дает менее надежное разделение исследуемых классов подготовки спортсменов. Уровень доверия к показателю  $UFS$  эксперты определяют величиной 0,65, а к показателю  $UFR$  – 0,7.

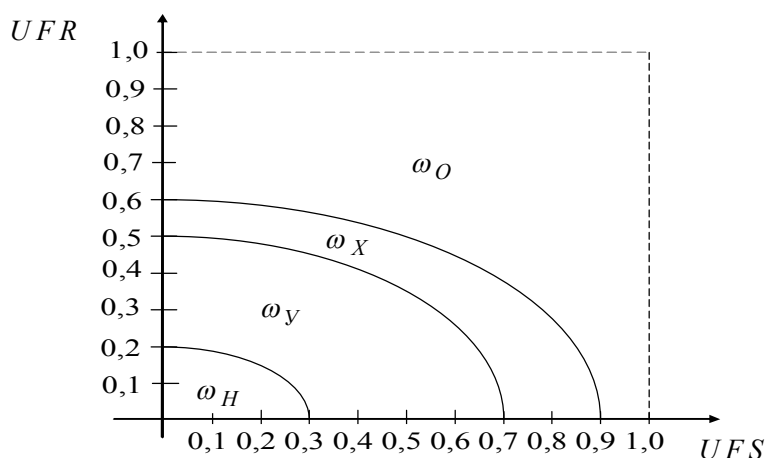


Рисунок 2 – Распределение классов  $\omega_r$  в пространстве  $\{UFS, UFR\}$

Полученные в работе нечеткие математические модели оценки уровня спортивной подготовки обеспечивают пригодное для практического использования качество

классификации. Дальнейшие исследования позволят использовать полученные модели для решения задач профессионального отбора, оценки уровня тренированности спортсменов и прогнозирования результативности спортивных достижений, включая высшие.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баевский, Р.М. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний / Р.М. Баевский, А.П. Барсенева. – М.: Медицина, 1997. – 235 с.
2. Белоцерковский, З.Б. Эргометрические и кардиологические критерии физической работоспособности у спортсменов. – М.: Советский спорт, 2005. – 312 с.
3. Бойцов, А.В. Синтез решающих правил для оценки уровня психоэмоционального напряжения и утомления с использованием двумерных классификационных пространств и векторной алгебры / В.И. Серебровский, А.В. Бойцов, А.Н. Шуткин, С.Н. Корневская // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 5(56). – С. 58–63.
4. Корневский, Н.А. Использование нечеткой логики принятия решений для медицинских экспертных систем / Н.А. Корневский // Медицинская техника. – 2015. – № 1. – С. 33–35.
5. Корневский, Н.А. Теоретические основы биофизики акупунктуры с приложениями в медицине, психологии и экологии на основе нечетких сетевых моделей / Н.А. Корневский, Р.А. Крупчатников, Р.Т. Аль-Касасбех. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 528 с.
6. Корневский, Н.А. Метод синтеза гетерогенных нечетких правил для анализа и управления состоянием биотехнических систем. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2013. – № 2. – С. 99–103.
7. Корневский, Н.А. Синтез нечетких сетевых моделей обучаемых по структуре данных для медицинских экспертных систем / Н.А. Корневский, Р.А. Крупчатников, С.А. Горбатенко // Медицинская техника. – 2008. – № 2. – С. 18–24.
8. Корневский, Н.А. Метод прогнозирования и диагностики состояния здоровья на основе коллективов нечетких решающих правил / Н.А. Корневский, Р.В. Рупкой, С.Д. Долженков // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2013. – Т. 12. – № 4. – С. 905–909.
9. Корневский, Н.А. Метод оценки функционального резерва человека оператора на основе комбинированных правил нечеткого вывода / Н.А. Корневский, А.Н. Коростелев, Л.В. Стародубцева, В.В. Серебровский // Биотехносфера. – 2012. – № 1 (19). – С. 44–49.
10. Леонова, А.Б. Психодиагностика функциональных состояний человека. – М.: Изд-во Моск.ун-та, 1984. – 2000 с.
11. Руненко, С.Д. Исследование и оценка функционального состояния спортсменов / С.Д. Руненко, Е.А. Таламбум, Е.Е. Ачкасов // Учебное пособие для студентов лечебных и педиатрических факультетов медицинских вузов. ММА им. И.М. Сеченова, М. – 2010. – 72 с.
12. Титов, В.С. Классификация функционального состояния человека и нечеткая оценка его уровня / В.С. Титов, Т.Н. Сапитонова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. – № 2. – Ч. 3. – С. 320–324.
13. Филатова, О.И. Метод, модели и алгоритм анализа и управления функциональным состоянием человека на основе нечетких гетерогенных правил принятия решений / О.И. Филатова // дисс. канд. техн. наук: 05.11.17, защищена 11.11.11, Курск, 2011.
14. Korenevskiy, N.A. Fuzzy determination of the humans level of psycho-emotional / N. A. Korenevskiy, R.T. Al-Kasasbeh, F. Ionescous, M. Alshamasin, E. Alkasasbeh, A.P. Smith // IFMBE Proceedings. – 2013. – V. 40. – IFMBE. – P. 213–216.
15. Korenevskiy, N.A. Fuzzy determination of the humans level of psycho-emotional. / N. A. Korenevskiy, R.T. Al-Kasasbeh, F. Ionescous, M. Alshamasin, E. Alkasasbeh, A.P. Smith // Mega-conference on Biomedical Engineering: proceedings of the 4th International Conference of the Development of Biomedical Engineering. – Ho Chi Minh City, Vietnam, January 8–12. – 2012. – P. 354–357.
16. Korenevskii, N.A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in Medical Expert Systems /N. A. Korenevskii // Biomedical Engineering. New York. – 2015. – Vol. 49. – № 1 – P. 46–49.

### **Корневский Николай Алексеевич**

Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск  
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой  
биомедицинской инженерии  
Тел.: (4712) 22–26–60  
E-mail: kstu-bmi@yandex.ru

### **Магеровский Михаил Александрович**

Центральный спортивный клуб армии, г. Москва  
Тренер  
Тел.: (4712) 22–26–60  
E-mail: kstu-bmi@yandex.ru

### **Шуткин Александр Николаевич**

Воронежский институт государственной  
противопожарной службы МЧС России, ВИ ГПС  
МЧС г. Воронеж  
Заместитель начальника института по учебной работе,  
кандидат физ.-мат. наук  
Тел.: (4712) 22–26–60  
E-mail: kstu-bmi@yandex.ru

### **Федянин Виталий Иванович**

Воронежский институт государственной  
противопожарной службы МЧС России, г. Воронеж  
Доктор технических наук, профессор  
Тел.: (4712) 22–26–60  
E-mail: kstu-bmi@yandex.ru

N.A. KORENEVSKIY, M.A. MAGEROVSKIY, A.N. SHUTKIN, V.I. FEDYANIN

## FUZZY MODELS OF PROFESSIONAL ORIENTATION AND ASSESSMENT OF TRAINING OF ATHLETES

*Mathematical models decisions are taken on the directions of sports training and fitness level evaluation of athletes in sports at various levels with the use of fuzzy logic.*

**Keywords:** professional orientation, the level of sports training, fuzzy decision logic.

### BIBLIOGRAPHY

1. Bayevskiy, R.M. Otsenka adaptatsionnykh vozmozhnostey organizma i risk razvitiya zabolevaniy / R.M. Bayevskiy, A.P. Barseneva. – M.: Meditsina, 1997. – 235 s.
2. Belotserkovskiy, Z.B. Ergometricheskiye i kardiologicheskiye kriterii fizicheskoy rabotosposobnosti u sportsmenov. – M.: Sovetskiy sport, 2005. – 312 s.
3. Boytsov, A.V. Sintez reshayushchikh pravil dlya otsenki urovnya psikhoemotsionalnogo napryazheniya i utomleniya s ispolzovaniyem dvumernykh klassifikatsionnykh prostranstv i vektornoy algebry / V.I. Serebrovskiy, A.V. Boytsov, A.N. Shutkin, S.N. Korenevskaya // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2014. – № 5(56). – S. 58–63.
4. Korenevskiy, N.A. Ispolzovaniye nechetkoy logiki prinyatiya resheniy dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem / N.A. Korenevskiy // Meditsinskaya tekhnika. – 2015. – № 1. – S. 33–35.
5. Korenevskiy, N.A. Teoreticheskiye osnovy biofiziki akupunktury s prilozheniyami v meditsine, psikhologii i ekologii na osnove nechetkikh setevykh modeley / N.A. Korenevskiy, R.A. Krupchatnikov, R.T. Al-Kasasbeh. – Staryy Oskol: TNT, 2013. – 528 s.
6. Korenevskiy, N.A. Metod sinteza geterogennykh nechetkikh pravil dlya analiza i upravleniya sostoyaniyem biotekhnicheskikh sistem. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye. – 2013. – № 2. – S.99–103.
7. Korenevskiy, N.A. Sintez nechetkikh setevykh modeley obuchayemykh po strukture dannykh dlya meditsinskikh ekspertnykh sistem / N.A. Korenevskiy, R.A. Krupchatnikov, S.A. Gorbatenko // Meditsinskaya tekhnika. – 2008. – № 2. – S. 18–24.
8. Korenevskiy, N.A. Metod prognozirovaniya i diagnostiki sostoyaniya zdorovya na osnove kollektivov nechetkikh reshayushchikh pravil / N.A. Korenevskiy, R.V. Rutskoy, S.D. Dolzhenkov // Sistemnyy analiz i upravleniye v biomeditsinskikh sistemakh. – 2013. – T. 12. – № 4. – S. 905–909.
9. Korenevskiy, N.A. Metod otsenki funktsionalnogo rezerva cheloveka operatora na osnove kombinirovannykh pravil nechetkogo vyvoda/ N.A. Korenevskiy, A.N. Korostelev, L.V. Starodubtseva, V.V. Serebrovskiy // Biotekhnosfera. – 2012. – № 1 (19). – S. 44–49.
10. Leonova, A.B. Psikhodiagnostika funktsionalnykh sostoyaniy cheloveka. – M.: Izd-vo Mosk.un-ta, 1984. – 2000 s.
11. Runenko, S.D. Issledovaniye i otsenka funktsionalnogo sostoyaniya sportsmenov / S.D. Runenko, Ye.A. Talambum, Ye.Ye. Achkasov // Uchebnoye posobiye dlya studentov lechebnykh i pediatricheskikh fakultetov meditsinskikh vuzov. MMA im. I.M. Sechenova, M. – 2010. – 72 s.
12. Titov, V.S. Klassifikatsiya funktsionalnogo sostoyaniya cheloveka i nechetkaya otsenka yego urovnya / V.S. Titov, T.N. Sapitonova // Izvestiya Yugo-Zapadnogo universiteta. 2012. – № 2. – CH. 3. – S. 320–324.
13. Filatova, O.I. Metod, modeli i algoritm analiza i upravleniya funktsionalnym sostoyaniyem cheloveka na osnove nechetkikh geterogennykh pravil prinyatiya resheniy / O.I. Filatova // diss. kand. tekhn. nauk: 05.11.17, zashchishchena 11.11.11, Kursk, 2011.
14. Korenevskiy, N.A. Fuzzy determination of the humans level of psycho-emotional / N. A. Korenevskiy, R.T. Al-Kasasbeh, F. Ionescuc, M. Alshamasin, E. Alkasasbeh, A.P. Smith // IFMBE Proceedings. – 2013. – V. 40. – IFMBE. – P. 213–216.
15. Korenevskiy, N.A. Fuzzy determination of the humans level of psycho-emotional. / N. A. Korenevskiy, R.T. Al-Kasasbeh, F. Ionescuc, M. Alshamasin, E. Alkasasbeh, A.P. Smith // Mega-conference on Biomedical Engineering: proceedings of the 4th International Conference of the Development of Biomedical Engineering. – Ho Chi Minh City, Vietnam, January 8–12. – 2012. – P. 354–357.
16. Korenevskii, N.A. Application of Fuzzy Logic for Decision-Making in Medical Expert Systems /N. A. Korenevskii // Biomedical Engineering. New York. – 2015. – Vol. 49. – № 1 – P. 46–49.

**Korenevskiy Nikolay Alekseyevich**  
Southwestern State University, Kursk  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head.  
Department of Biomedical Engineering  
Ph.: (4712) 22–26–60  
E-mail: kstu-bmi@yandex.ru

**Magerovskiy Mikhail Aleksandrovich**  
Central Sports Army Club, Moscow  
Trainer  
Ph.: (4712) 22–26–60  
E-mail: kstu-bmi@yandex.ru

**Shutkin Aleksandr Nikolayevich**  
Voronezh Institute of the State Fire Service of  
EMERCOM of Russia, VI Fire Service of EMERCOM  
Voronezh  
Deputy Head of the Institute for Academic Affairs,  
Candidate of Physics and Mathematics. Sciences  
Ph.: (4712) 22–26–60  
E-mail: kstu-bmi@yandex.ru

**Fedyanin Vitaliy Ivanovich**  
Voronezh Institute of the State Fire Service of  
EMERCOM of Russia, Voronezh  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
Ph.: (4712) 22–26–60  
E-mail: kstu-bmi@yandex.ru

УДК 629.4.015

Ю.В. ИВАНОВ, В.Я. РАСПОПОВ, Р.В. АЛАЛУЕВ

## МАЯТНИКОВЫЙ ДАТЧИК УРОВНЯ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

*Проведен анализ зависимости времени переходного процесса от температуры окружающей среды в маятниковом датчике уровня с жидкостным демпфированием. Предложена конструкция датчика уровня с электромагнитным демпфированием собственных колебаний. Приведены результаты моделирования, показывающие эффективность его работы.*

**Ключевые слова:** *путевые машины, выправка пути, датчик уровня, математическая модель.*

Выправка железнодорожного пути с одновременным уплотнением балласта осуществляется с помощью целого комплекса специальных путевых машин в трех плоскостях: в плане (рихтовка), в продольном профиле (нивелировка) и в поперечном профиле (выправка по уровню). Контроль взаимного положения рельсовых нитей, то есть превышение одного рельса над другим, необходимо производить при всех видах выправки. В качестве чувствительного элемента автоматической системы выправки по уровню используется датчик на базе физического маятника.

Известные конструкции таких датчиков построены по одинаковой схеме [1, 2]. В корпусе размещен массивный маятник. Измерение угла отклонения основания от направления местной вертикали осуществляется различными способами. В маятниковом датчике уровня ELT–133.00 Австрийской фирмы «Plasser and Theurer» преобразование углонапряжения осуществляется с помощью кругового высокоточного потенциометра с напыленным резистивным слоем. Передача колебаний маятника на ось вращения потенциометра происходит с помощью шкивов и гибкой передачи (стальной тросик или кордовая нить или зубчатый ремень). Основным недостатком такого способа съема сигнала является наличие статической ошибки датчика, обусловленной моментом трения в механической передаче. Кроме того, имеет место износ потенциометра как при работе, так и при транспортировке датчика. В других конструкциях маятниковых датчиков уровня съем сигнала осуществляется с помощью индуктивных датчиков угла (измеритель наклонов ИН–2 разработки Тульского государственного университета, датчик уровня разработанный в ВНИИЖТ) [1]. Индуктивные датчики угла не имеют трения, но по сравнению с прецизионными потенциометрами обладают более высокой нелинейностью характеристики и достаточно большой величиной нулевого сигнала. Указанных выше недостатков лишены оптико–электронные датчики угла, на выходе которых формируется цифровой код.

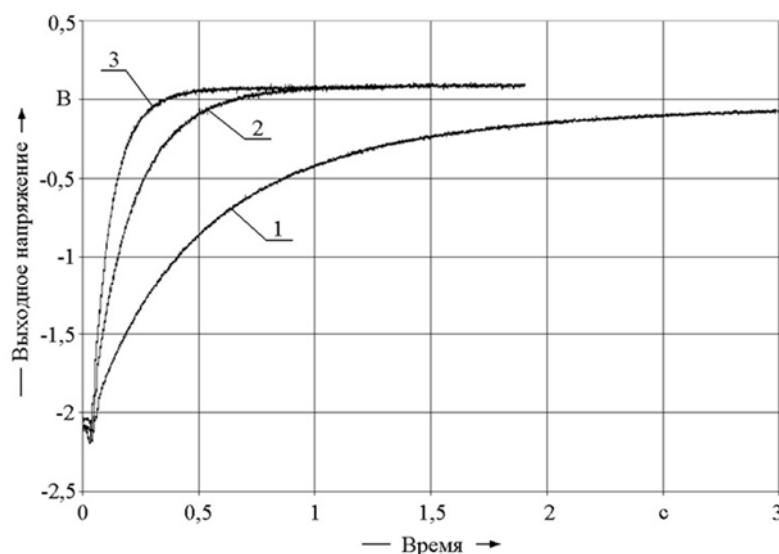
Демпфирование собственных колебаний маятника во всех перечисленных конструкциях осуществляется вязкой полиметилсилоксановой жидкостью. При изменении температуры окружающей среды происходит изменение вязкости демпфирующей жидкости, что приводит к изменению динамики маятникового датчика уровня. На рисунке 1 показаны графики реакции маятникового датчика уровня с жидкостным демпфированием на единичное ступенчатое воздействие при различных значениях температуры окружающей среды, полученные экспериментально [3].

Из приведенных графиков следует, что если при повышенной температуре окружающей среды вязкость жидкости и зазор между маятником и основанием выбирать как, чтобы в переходном процессе не возникало перерегулирования (график 3), то при пониженной температуре (график 1) время переходного процесса многократно увеличивается и динамические характеристики датчика уровня становятся неприемлемыми, в результате чего он становится неработоспособным.

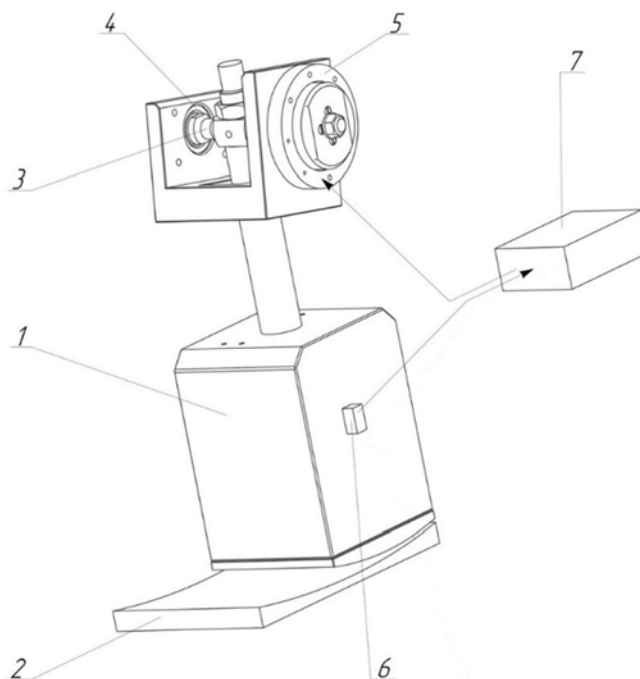
Для устранения этого недостатка предложена конструктивная схема маятникового датчика уровня с электромагнитным демпфированием, показанная на рисунке 2.

В динамической системе, которой является маятниковый датчик уровня, момент демпфирования пропорционален угловой скорости движения маятника. Таким образом, если с помощью датчика момента 5 приложить к оси подвеса 3 момент, пропорциональный

угловой скорости движения маятника, то это приведет к затуханию собственных колебаний маятника.



**Рисунок 1 – Реакция маятникового датчика уровня с жидкостным демпфированием на единичное ступенчатое воздействие при различных значениях температуры окружающей среды:**  
 1 –  $T = -20^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T = +20^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T = +50^{\circ}\text{C}$ .



**Рисунок 2 – Конструктивная схема маятникового датчика уровня с электромагнитным демпфированием:**  
 1 – маятник; 2 – основание; 3 – ось подвеса маятника; 4 – датчик угла; 5 – датчик момента;  
 6 – датчик угловой скорости (ДУС); 7 – усилительно-преобразовательное устройство

Предложенный способ создания демпфирующего момента исключает применение вязкой жидкости и устраняет зависимость динамических характеристик датчика от температуры окружающей среды.

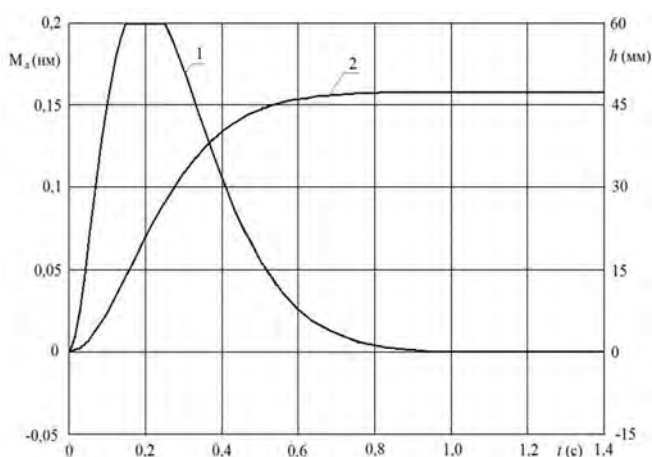
Информацию об угловой скорости маятника можно получить различными способами. С помощью микромеханического ДУС 6 (рисунок 2), размещенного на маятнике можно измерить угловую скорость маятника. При этом, для правильного выбора рабочего диапазона и чувствительности ДУС необходимо знать максимальную угловую скорость затухающих собственных колебаний маятника.



Информация об угловой скорости колебаний маятника может быть также получена путем дифференцирования сигнала датчика угла  $\varphi$  (рисунок 2), который является выходным сигналом датчика уровня.

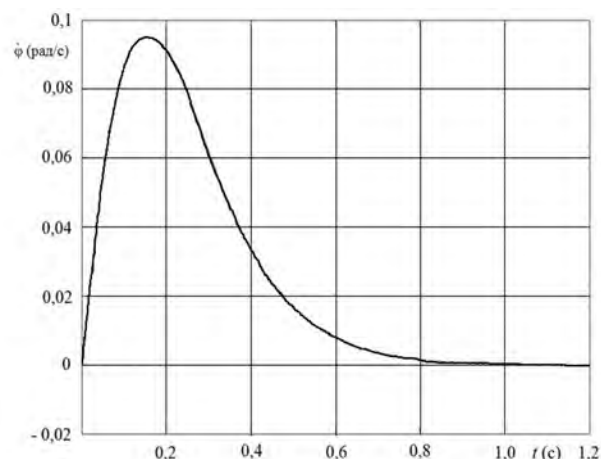
На рисунках 3 и 4 показаны результаты моделирования маятникового датчика уровня с электромагнитным демпфированием, представляющие собой реакцию на скачкообразное изменение угла наклона основания. Моделирование проводилось при следующих параметрах датчика: масса маятника  $m = 4,54$  кг, приведенная длина подвеса маятника  $d = 0,22$  м, максимальный момент датчика момента  $M_{\text{дм}} = 0,2$  Нм. Величина скачкообразного изменения угла наклона основания задавалась  $0,031$  рад, что не превышает максимально допустимой подъемки пути – 50 мм. В процессе моделирования угловая скорость движения вычислялась как производная от угла отклонения маятника  $\varphi$ .

На рисунке 4 показана зависимость угловой скорости маятника от времени, полученная при моделировании.



**Рисунок 3 – Результаты моделирования маятникового датчика уровня с электромагнитным демпфированием:**

1 – изменение электромагнитного демпфирующего момента; 2 – реакция маятникового датчика уровня на скачкообразное воздействие



**Рисунок 4 – Зависимость от времени угловой скорости маятника**

Из результатов моделирования следует, что применение электромагнитного демпфирования обеспечивает требуемые характеристики переходного процесса. Ограничение момента демпфирования на уровне 0,2 Нм не приводит к ухудшению динамических характеристик датчика уровня и позволяет применить в данной конструкции датчик момент постоянного тока ДМ–10, имеющий характеристики, приведенные в таблице 1.

**Таблица 1 – Технические характеристики датчика момента ДМ–10**

Наименование параметра	Значение параметра
Крутизна, Нм/А	0,25
Максимальный потребляемый ток, А	1
Электрическое сопротивление обмотки, Ом	20
Габариты (наружный диаметр, внутренний диаметр, высота), мм	72×26×17
Масса, г	300

Из графика на рисунке 4 следует, что максимальная угловая скорость маятника не превышает 0,1 рад/с (6 град/с). Это позволяет сформулировать требования к диапазону измерения ДУС для системы электромагнитного демпфирования. В качестве примера в таблице 2 приведены основные технические характеристики микромеханического ДУС LPR403AL фирмы STMicroelectronics, удовлетворяющего таким требованиям.

Таким образом, в данной работе показано, что предложенная конструкция маятникового датчика уровня с электромагнитным демпфированием работоспособна и реализуема на существующей отечественной и зарубежной элементной базе. Применение электромагнитного демпфирования позволяет значительно расширить диапазон рабочих

температур маятникового датчика уровня и повысить эффективность использования контрольно-измерительных систем путевых машин.

Таблица 2 – Технические характеристики микромеханического ДУС LPR403AL

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон измерения (град/с)	$\pm 30$
Чувствительность (мВ/град/с)	33,3
Нелинейность статической характеристики (%)	$\pm 1$
Рабочий диапазон частот (Гц)	140
Спектральная плотность шума (град/с/ $\sqrt{\text{Гц}}$ )	0,01
Рабочий диапазон температур ( $^{\circ}\text{C}$ )	$-40 +85$
Габариты (мм)	$5 \times 4 \times 1,1$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распопов В.Я. Датчики уровня систем управления железнодорожных машин / В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов. – Тул. гос. ун-т. Тула, 2000. – 176 с.
2. Распопов, В.Я. Датчики уровня систем управления выправочных железнодорожных машин / В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов, С.А. Зотов // Датчики и системы. – 1999. – № 4. – С. 40 – 43.
3. Дмитриев, В.А. Датчик уровня для путевых железнодорожных машин на базе физического маятника / В.А. Дмитриев, В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов, Р.В. Алалуев // Датчики и системы. – 2006. – № 7. – С. 56 – 58.

**Иванов Юрий Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»,  
г Тула  
Доктор технических наук,  
профессор кафедры «Приборы  
управления»  
E-mail: ivanov-uv@bk.ru

**Распопов Владимир Яковлевич**  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»,  
г. Тула  
Доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
«Приборы управления»  
E-mail: tgupu@yanex.ru

**Алалуев Роман Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Тульский  
государственный университет»,  
г. Тула  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Приборы  
управления»  
E-mail: tgupu@yanex.ru

Yu.V. IVANOV, V.Ya. RASPOPOV, R.V. ALALUEV

## THE PENDULUM SENSOR OF THE LEVEL WITH THE ELECTROMAGNETIC DAMPING FOR THE CONTROL OF THE HORIZONTALITY OF THE RAILWAY TRACK

*The analysis of the dependence of the time of the transient process on the temperature of the environment in the pendulum sensor of the level with liquid damping was carried out. The construction of the sensor of the level with the electromagnetic damping of the natural oscillations was offered. The results of the modeling, which show the effectiveness of its work, are given.*

**Keywords:** The rail track machine, leveling railway, The level sensor, mathematical model.

## BIBLIOGRAPHY

1. Raspopov V.YA. Datchiki urovnya sistem upravleniya zheleznodorozhnykh mashin / V.YA. Raspopov, YU.V. Ivanov. – Tul. gos. un-t. Tula, 2000. – 176 s.
2. Raspopov, V.YA. Datchiki urovnya sistem upravleniya vypravochnykh zheleznodorozhnykh mashin / V.YA. Raspopov, YU.V. Ivanov, S.A. Zotov // Datchiki i sistemy. – 1999. – № 4. – S. 40 – 43.
3. Dmitriyev, V.A. Datchik urovnya dlya putevykh zheleznodorozhnykh mashin na baze fizicheskogo mayatnika / V.A. Dmitriyev, V.YA. Raspopov, YU.V. Ivanov, R.V. Alaluyev // Datchiki i sistemy. – 2006. – № 7. – S. 56 – 58.

**Ivanov Yuriy Vladimirovich**  
Tula State University, Tula  
Doctor of Engineering, professor of  
department «Devices of control»  
E-mail: ivanov-uv@bk.ru

**Raspopov Vladimir Yakovlevich**  
Tula State University, Tula  
Doctor of Engineering, professor,  
chief of department «Devices of  
control»  
E-mail: tgupu@yanex.ru

**Alaluyev Roman Vladimirovich**  
Tula State University, Tula  
Ph.D, Assistant Professor of  
department «Devices of control»  
E-mail: tgupu@yanex.ru

УДК 621.01

А.С. КОЗЛОВ, Р.Я. ЛАБКОВСКАЯ, В.Л. ТКАЛИЧ, О.И. ПИРОЖНИКОВА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

*В работе рассмотрены вопросы моделирования динамики контактных сердечников герконов с использованием известного из литературы матрично-топологического метода, который позволяет корректно моделировать многозвенные сложнопрофильные балочные контактные сердечники.*

**Ключевые слова:** граф, алгоритм, электромеханический элемент, датчик, системы управления.

Матрично-топологический метод применим для описания колебательных процессов балочных элементов микросенсоров и контактных сердечников (КС) герконов модель с сосредоточенными параметрами. Замена системы с распределенными параметрами эквивалентной моделью с сосредоточенными параметрами достигается применением метода Рэлея. В этом методе приходят к рассмотрению системы с большей жесткостью чем данная, вследствие чего получается более высокая частота колебаний по сравнению с истинной.

Для анализа колебательных процессов в электромеханических элементах (ЭМЭ) и определения собственных частот можно применить дифференциальный метод, использующий модель плоского ЭМЭ с распределенными параметрами. Расчетные значения собственных частот колебаний плоских ЭМЭ, полученные этим методом, максимально близки к действительным значениям этих параметров.

Однако при аналитическом исследовании плоских ЭМЭ, во многих случаях целесообразно осуществлять переход от системы с распределенными параметрами к системе с сосредоточенными параметрами, а также пользоваться не прямым дифференциальным методом анализа, а приближенными методами, с помощью которых возможно определить собственные частоты плоских ЭМЭ с дискретно изменяющимся моментом инерции сечения с удовлетворительной для данной задачи точностью. Исходя из этого, в [1] был разработан приближенный матрично-топологический метод колебательных процессов в ЭМЭ с симметричным распределением массы относительно продольной оси геркона. Этот метод позволяет определять собственные частоты ЭМЭ с дискретно изменяющимся моментом инерции сечения, если их центр масс лежит на оси ЭМЭ.

Зная эквивалентные значения массы  $m_{эi}$ , жесткости  $c_{эi}$  и коэффициента затухания  $h_{эi}$  для модели геркона, запишем уравнение системы с сосредоточенными параметрами в общем виде [1]:

$$Q = GW, \quad (1)$$

где  $W$  – вектор-столбец задающей силы;

$Q$  – искомый вектор смещений;

$G$  – матрица комплексной жесткости.

Решение матричного уравнения (1) имеет вид:

$$Q = G^{-1}W. \quad (2)$$

Формализация записи уравнения (2) для решения достигается при использовании узловой топологической матрицы  $A$ . Уравнение (1) в матрично-топологической и символической форме принимает вид [1, 2]:

$$ACA^T \dot{X} = A \dot{F}, \quad (3)$$

где  $C$  – диагональная матрица комплексной жесткости;

$\dot{F}$  – вектор-столбец комплексных сил;

$\dot{X}$  – вектор-столбец комплексных смещений.

Вычисление по уравнению (3) осуществляется введением исходных матриц  $A$ ,  $C$ ,  $\dot{F}$  которые находятся по топологической модели геркона. В результате находим искомые перемещения точек свободного конца КС, а также определяем собственные частоты колебаний этих КС геркона.

Повысить виброударопрочность геркона, и также снизить дребезг контактных сердечников, можно путем разворота плоскости контактирования КС.

Рассмотрим разработанную с этой целью автором данной работы конструкцию геркона [3–5]. Такой геркон представляет собой герметизированный баллон, в противоположных торцах которого запаяны два КС, изогнутых так, что они образуют контактирующие участки, плоскости которых расположены под углом  $90^\circ$  к плоскостям КС, параллельны одна другой и направлены вдоль продольной оси герметизированного баллона (рисунок 1). Модель этой конструкции приведена на рисунке 2. Предлагаемая конструкция исключает замыкание контактных сердечников от вибрации, и устраняет дребезг при размыкании геркона. Дребезг при замыкании в этой конструкции также практически устраняется, (он может проявиться только в незначительной степени, но уже не как следствие колебательных процессов возникающих в КС геркона, а из-за возможного скольжения КС друг относительно друга в начальный момент замыкания геркона). Для предотвращения возникновения искрения в момент замыкания такого контакта поверхность КС в зоне взаимодействия должна иметь регулярный микрорельеф, что уменьшит разрядные явления в зоне перекрытия [1].

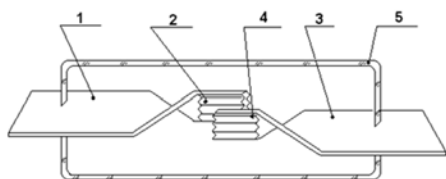


Рисунок 1 – Бездребезговая конструкция геркона с развернутой плоскостью контактирования

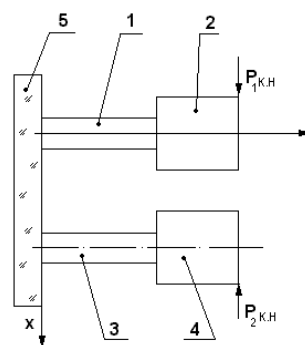


Рисунок 2 – Модель КС геркона с развернутой плоскостью контактирования и распределенными параметрами

Опытный образец такой модификации изготовлен и прошел лабораторные испытания. Практические результаты подтвердили правильность теоретических выводов, что нашло свое отражение в авторском свидетельстве [5].

Рассмотрим топологическую модель колебательной системы геркона с развернутой плоскостью контактирования. КС рассматриваемого геркона с дискретно изменяющимся моментом инерции сечения могут быть представлены в виде дискретной механической системы, состоящей из  $k$ –абсолютно жестких сосредоточенных масс и  $k$ –абсолютно упругих невесомых участков в виде пружин. Такая идеализированная механическая система имеет  $k$ –собственных частот и форм колебаний.

При определении частот и форм собственных колебаний подобных систем эффективным является матрично–топологический метод анализа, использующий системы с сосредоточенными параметрами. Замену системы с распределенными параметрами эквивалентной моделью с сосредоточенными параметрами осуществляем аналогично с заменой, сделанной для язычковых симметричных замыкающих КС. Стекланный герметизированный баллон (рисунок 1) представим вертикальной стенкой 5 (рисунок 2), горизонтальные участки 1 и 3 КС (рисунок 1) изобразим стержнями (рисунок 2), которые жестко заделаны одним концом в стенку 5, а участки 2 и 4 КС (рисунок 1) представим стержнями 2 и 4 (рисунок 2).

Центры масс каждого из стержней лежат на продольной оси КС, которая совпадает с продольной осью самого геркона. КС такой модели представляют собой систему с распределенными параметрами.

После замены распределенных параметров сосредоточенными получим модель, приведенную на рисунок 3, которой соответствует граф, изображенный на рисунок 4. Ветви  $C_B$  и  $h_B$  можно не учитывать.

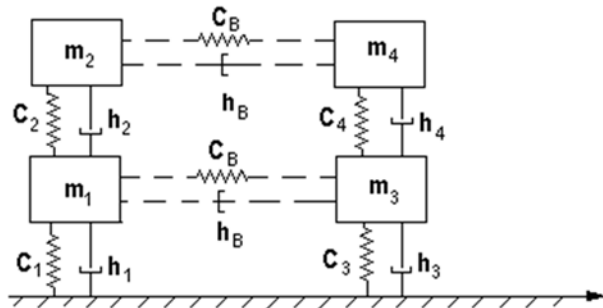


Рисунок 3 – Модель безреbreзговой системы КС с сосредоточенными параметрами

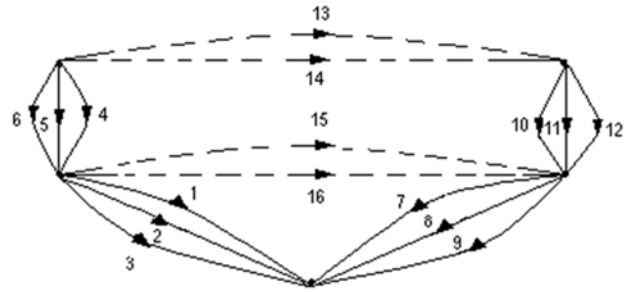


Рисунок 4 – Граф модели с сосредоточенными параметрами

Узловые матрицы, полученные из описания графа, имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$C = \text{diag} \begin{bmatrix} c_1 & -m_1\omega^2 & j\omega h_1 & c_2 & -m_2\omega^2 & j\omega h_2 \\ c_3 & -m_3\omega^2 & j\omega h_3 & c_4 & -m_4\omega^2 & j\omega h_4 \end{bmatrix};$$

$$\dot{F} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{F}_1 & 0 & 0 & \dot{F}_2 & 0 & 0 & -\dot{F}_3 & 0 & 0 & -\dot{F}_4 & 0 \end{bmatrix}.$$

В результате получаем систему из четырех уравнений, позволяющую определить перемещения не заделанного в стенку конца стержня 1 (рисунок 3) –  $\dot{X}_1$ ; свободного конца стержня 2 –  $\dot{X}_2$ ; не заделанного в стенку конца стержня 2 –  $\dot{X}_3$ ; свободного конца стержня 4 –  $\dot{X}_4$ :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \left( \frac{-m_1\omega^2 + j\omega h_1 + c_1}{\dot{F}_1} \right)^{-1} \\ \dot{X}_2 = \left( \frac{-m_2\omega^2 + j\omega h_2 + c_2}{\dot{F}_2} \right)^{-1} \\ \dot{X}_3 = \left( \frac{-m_3\omega^2 + j\omega h_3 + c_3}{-\dot{F}_3} \right)^{-1} \\ \dot{X}_4 = \left( \frac{-m_4\omega^2 + j\omega h_4 + c_4}{-\dot{F}_4} \right)^{-1} \end{cases}$$

Результаты расчета параметров колебательного процесса такой конструкции, полученные матрично–топологическим методом, приведены в [1].

Полученные теоретические данные отличаются от соответствующих экспериментальных значений на более чем на 7–9%.

Разработана матрично–топологическая модель для частотного анализа сложнопрофильных и многозвенных ЭМЭ [7] на основе перехода к системе с сосредоточенными параметрами, с использованием методов: электромеханических аналогий, Релея–Ритца и теории графов. На примере одной из трех конструкций колебательных систем герконов осуществлено сравнение теоретических результатов расчета собственных частот ЭМЭ, полученных матрично–топологическим методом, с соответствующими экспериментально полученными величинами при пьезоэлектрическом и оптическом методах исследования частотных спектров ЭМЭ. Различие не превышало 7–9 %, что говорит о хорошей адекватности разработанной математической модели реальному колебательному процессу в конструкциях герконов. Аналогичные результаты получены при сравнении теоретических и экспериментальных данных по 4–х звенным ЭМЭ [8]. Корректность частотного анализа достигалась применением частотных фильтров Фурье.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткалич, В.Л. Надежность магнитоуправляемых контактов в системах управления / В.Л. Ткалич. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. – 98 с.
2. Ткалич, В.Л. Топологическая модель контактных сердечников геркона с сосредоточенными параметрами / В.Л. Ткалич, Н.Н. Губанов // деп. во ВИНТИ. – 1994. – № 219–294. – 12 с.
3. Пат. Российская Федерация 2016433, МПК H01 H1/66. Магнитоуправляемый контакт // Ткалич В.Л., Беккер Я.М., Фролова Е.Г.; заявитель и патентообладатель Научно–исследовательский институт электротехнических устройств. – № 4917333; заявл. 30.08.1993. – 2 с.
4. Пат. Российская Федерация 136920, МПК H01 H1/66. Магнитоуправляемый контакт // Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л., Пирожникова О.И., Коробейников А.Г.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». – № 2013137233/07; заявл. 08.08.2013; опубл. 20.01.14, Бюл. № 2. – 2 с.
5. Пат. Российская Федерация 144305, МПК H01 H1/66. Магнитоуправляемый контакт // Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л., Пирожникова О.И., Коробейников А.Г.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». – № 2014108108/07; заявл. 03.03.2014; опубл. 20.08.14. – 2 с.
6. Пат. Российская Федерация 144304, МПК H01 H1/66. Магнитоуправляемый контакт // Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л., Пирожникова О.И.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики». – № 2014111614/07; заявл. 25.03.2014; опубл. 20.08.14. – 2 с.
7. Лабковская, Р.Я., Разработка библиотеки конечных элементов для САПР упругих конструкций герконов / Р.Я. Лабковская, В.Л. Ткалич, О.И. Пирожникова // Известия вузов. Приборостроение. – Санкт–Петербург: НИУ ИТМО. – 2013. – Т. 56. – № 3. – С. 21–24.
8. Лабковская, Р.Я. Анализ присоединенных масс упругих чувствительных элементов ртутных герконов / Р.Я. Лабковская, В.Л. Ткалич, О.И. Пирожникова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – Санкт–Петербург: НИУ ИТМО. – 2012. – Т. 55, вып. 7. – С. 32–35.

#### **Козлов Алексей Сергеевич**

Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, г. Санкт–Петербург  
Аспирант кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем  
E–mail: zz.kozlov@gmail.com

#### **Ткалич Вера Леонидовна**

Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, г. Санкт–Петербург  
Доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем  
E–mail: vera\_leonidovna\_tkalich@mail.ru

#### **Лабковская Римма Яновна**

Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, г. Санкт–Петербург  
Кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем  
E–mail: studsovet\_itmo@mail.ru

#### **Пирожникова Ольга Игоревна**

Санкт–Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, г. Санкт–Петербург  
Кандидат технических наук, ассистент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем  
E–mail: cheezecake@mail.ru

A.S. KOZLOV, P.Ya. LABKOVCKAYA, V.L. TKALICH, O.I. PIROZHNIKOVA

## MODELING THE DYNAMICS OF ELECTROMECHANICAL ELEMENTS SENSORS CONTROL SYSTEMS

*The paper deals with the modeling of the dynamics of contact cores of reed switches with using well-known from literature matrix-topological method that allows correctly to model multilink geometrically-complex joist contact cores.*

**Keywords:** graph, algorithm, electromechanical element, sensor, control systems.

### BIBLIOGRAPHY

1. Tkalic, V.L. Nadezhnost magnitoupavlyayemykh kontaktov v cistemakh upravleniya / V.L. Tkalic. – CPb: CPb GITMO (TU), 2000. – 98 s.
2. Tkalic, V.L. Topologicheskaya model kontaktnykh cepdechnikov gepkona c cocpedotochennymi papametpami / V.L. Tkalic, N.N. Gubanov // dep. vo VINITI. – 1994. – № 219–294. – 12 s.
3. Pat. Rossiyskaya Federatsiya 2016433, MPK H01 H1/66. Magnitoupavlyayemyy kontakt // Tkalic V.L., Bekkep YA.M., Fpolkova E.G.; zayavitel i patentoobladatel Nauchno-issledovatel'skiy institut elektrotekhnicheskikh ustroystv. – № 4917333; zayavl. 30.08.1993. – 2 s.
4. Pat. Rossiyskaya Federatsiya 136920, MPK H01 H1/66. Magnitoupavlyayemyy kontakt // Labkovskaya R.YA., Tkalic V.L., Pirozhnikova O.I., Korobeynikov A.G.; zayavitel i patentoobladatel federalnoye gosudarstvennoye byudzhethnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego professionalnogo obrazovaniya «Sankt–Peterburgskiy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki». – № 2013137233/07; zayavl. 08.08.2013; opubl. 20.01.14, Byul. № 2. – 2 s.
5. Pat. Rossiyskaya Federatsiya 144305, MPK H01 H1/66. Magnitoupavlyayemyy kontakt // Labkovskaya R.YA., Tkalic V.L., Pirozhnikova O.I., Korobeynikov A.G.; zayavitel i patentoobladatel federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Sankt–Peterburgskiy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki». – № 2014108108/07; zayavl. 03.03.2014; opubl. 20.08.14. – 2 s.
6. Pat. Rossiyskaya Federatsiya 144304, MPK7 H01 H1/66. Magnitoupavlyayemyy kontakt // Labkovskaya R.YA., Tkalic V.L., Pirozhnikova O.I.; zayavitel i patentoobladatel federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Sankt–Peterburgskiy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki». – № 2014111614/07; zayavl. 25.03.2014; opubl. 20.08.14. – 2 s.
7. Labkovckaya, P.YA., Pazpabotka biblioteki konechnykh elementov dlya CAPP uppugikh konstruksiy gepkonov / P.YA. Labkovckaya, V.L. Tkalic, O.I. Pipozhnikova // Izvectiya vuzov. Ppibopoctpoenie. – Cankt–Petepbug: NIU ITMO. – 2013. – T. 56. – № 3. – S. 21–24.
8. Labkovckaya, P.YA. Analiz ppicoedinennykh mass uppugikh chuvctvitelnykh elementov rtutnykh gepkonov / P.YA. Labkovckaya, V.L. Tkalic, O.I. Pipozhnikova // Izvectiya vycshikh uchebnykh zavedeniy. Ppibopoctpoenie. – Cankt–Petepbug: NIU ITMO. – 2012. – T. 55, vyp. 7. – S. 32–35.

#### Kozlov Aleksey Sergeyevich

St. Petersburg National Research University of Information Technologies mehniki and Optics, St. Petersburg  
Student of design and security of computer systems  
E-mail: zz.kozlov@gmail.com

#### Labkovskaya Rimma Yanovna

St. Petersburg National Research University of Information Technologies mehniki and Optics, St. Petersburg  
PhD, assistant professor of design and security of computer systems  
E-mail: studsovet\_itmo@mail.ru

#### Tkalic Vera Leonidovna

St. Petersburg National Research University of Information Technologies mehniki and Optics, St. Petersburg  
Doctor of Technical Sciences, professor of design and security of computer systems  
E-mail: vera\_leonidovna\_tkalic@mail.ru

#### Pirozhnikova Olga Igorevna

St. Petersburg National Research University of Information Technologies mehniki and Optics, St. Petersburg  
Candidate of Technical Sciences, assistant of the department of design and security of computer systems  
E-mail: cheezecake@mail.ru

## **КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ**

УДК 616–079.5+535.372

В.В. ДРЁМИН, Е.В. ДРЁМИНА, Е.В. ЖАРКИХ, Е.В. ПОТАПОВА,  
Е.А. АЛИМИЧЕВА, Г.И. МАСАЛЫГИНА, А.В. ДУНАЕВ

### **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОЧЕТАННЫХ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ТКАНЕЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ПАЦИЕНТОВ С САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ**

*В работе показаны возможности сочетанного применения методов оптической неинвазивной диагностики (флуоресцентной спектроскопии и лазерной доплеровской флоуметрии) при исследовании жизнеспособности тканей пациентов с сахарным диабетом 2 типа. Проведена серия экспериментальных исследований на 15 пациентах эндокринологического отделения, а также на условно здоровых добровольцах. На основании полученных данных выявлено, что предложенный оригинальный метод может быть использован для диагностики нарушений микроциркуляторного русла и тканевого метаболизма в нижних конечностях пациентов на ранних стадиях, в том числе для уточнения патогенеза «диабетической стопы».*

**Ключевые слова:** оптическая неинвазивная диагностика, флуоресцентная спектроскопия, лазерная доплеровская флоуметрия, микроциркуляция крови, метаболизм.

Одним из путей к повышению качества в современной клинической практике, а также в практике передовых медико–биологических исследований является использование методов оптической диагностики. Преимущество таких методов связано с их неинвазивностью, хорошей разрешающей способностью, низкой себестоимостью процедуры, высокой производительностью. Перспективным направлением развития оптической диагностики является создание научных и инструментальных основ для создания методов *in vivo* анализа биологической ткани с целью оперативного определения ее жизнеспособности [1–7].

Одним из возможных приложений данных методов может быть диагностика нарушений, происходящих при осложнениях в нижних конечностях больных сахарным диабетом 2–ого типа (СД). В настоящее время согласно Международной диабетической федерации (International Diabetes Federation – IDF) проблема диагностики на ранних стадиях и контроль эффективности лечения СД является одной из самых острых в современном здравоохранении. Медицинская, социальная и экономическая значимость СД в первую очередь определяется высокой распространенностью этого заболевания, а также частотой развития у пациентов инвалидизирующих и снижающих качество жизни осложнений. По данным IDF, в 2015 г. насчитывалось 415 млн больных СД и эта цифра вырастет до 642 млн к 2040 г.

В связи с этим предлагается объединение часто используемого на сегодняшний день метода лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ) с методом флуоресцентной спектроскопии (ФС), что может позволить комплексно анализировать жизнеспособность тканей у больных СД, что потенциально увеличит информативность и достоверность получаемых диагностических результатов и позволит выявлять нарушения в системе микроциркуляции крови и метаболических процессах биоткани стоп конечностей на более ранних стадиях.

Метаболическая активность является важным параметром жизнеспособности ткани. Одной из оценок метаболической активности является соотношение коферментов NADH и FAD, определяемое по интенсивности их эндогенной флуоресценции. Известно, что одним из последствий нарушений в функционировании клеток при различных патологиях являются изменения в дыхательной цепи митохондрий. При этом наиболее вероятны изменения в



накоплении таких коферментов как NADH (восстановленная форма) и FAD (окисленная форма). Выявление таких изменений методами флуоресцентной спектроскопии является одним из многообещающих направлений *in vivo* диагностики [8, 9].

Таким образом, целью данной работы явилась попытка экспериментально изучить и проанализировать потенциальные возможности сочетанной регистрации параметров кровотока и флуоресценции кожных коферментов для диагностики нарушений в нижних конечностях больных сахарным диабетом 2 типа.

В комплексных экспериментальных исследованиях оценивались перфузия ткани кровью методом ЛДФ и содержание коферментов NADH и FAD методом ФС. Регистрация параметров перфузии и амплитуд флуоресценции коферментов обеспечивалась комплексом «ЛАЗМА МЦ» (ООО НПП «ЛАЗМА», Россия) одновременно и в одном объеме ткани. В доплеровском канале применялся лазерный модуль с длиной волны излучения 1064 нм, для возбуждения флуоресценции NADH и FAD использовались источники на длинах волн излучения 365 нм и 450 нм соответственно. Доставка зондирующего излучения и прием обратно отраженного от ткани вторичного излучения осуществлялась одним оптическим волоконным зондом одновременно двумя каналами (рисунок 1).

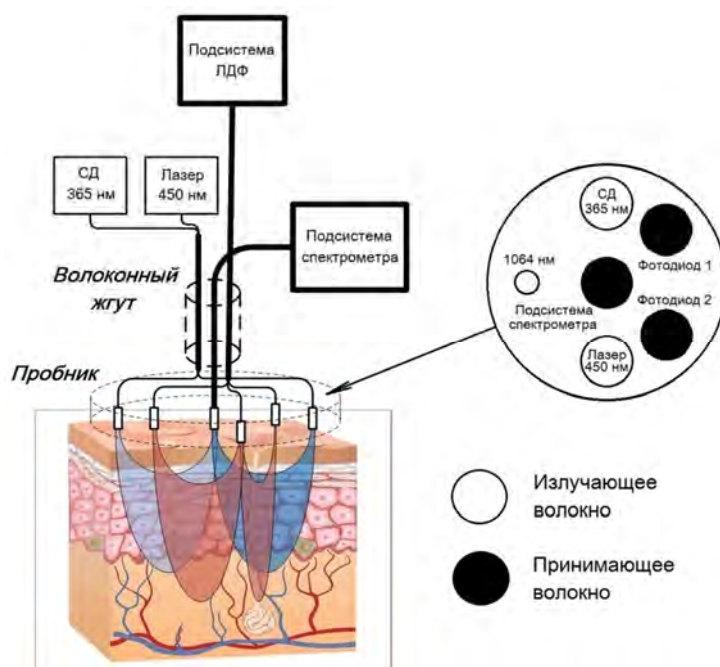


Рисунок 1 – Общая схема диагностического комплекса «ЛАЗМА МЦ»

В экспериментальных исследованиях приняли участие 15 пациентов с сахарным диабетом 2-ого типа в возрасте  $63 \pm 7$  лет эндокринологического отделения БУЗ Орловской области «Орловская областная клиническая больница». В исследование включали пациентов с длительным периодом заболевания и высоким уровнем гликированного гемоглобина (средний уровень –  $8,9 \pm 2,4\%$ ) и находящихся в зоне риска развития диабетической стопы. Контрольную группу составили 15 условно здоровых добровольцев схожего возраста (средний возраст  $53 \pm 5$  лет). Участники подписывали информированное согласие с указанием их готовности к участию в исследовании.

Производились фоновые записи (по 5 мин) в 2-х точках тыльной стороны стопы (1-я верхняя точка на медиальной линии стопы вверх, 2-я нижняя точка на линии между 1-й и 2-й плюсневыми костями) на 2-х ногах (схема расположения волокон представлена на рисунке 2). Причём, комплексом «ЛАЗМА МЦ» пара спектров регистрировалась за время записи перфузии в 30 с, таким образом за время диагностической процедуры всего было зарегистрировано 10 пар спектров.

Анализируемыми параметрами были амплитуды флуоресценции  $I_{NADH}$  и  $I_{FAD}$ , нормированные на интенсивность обратноотраженного излучения возбуждения  $I_{365}$  и  $I_{450}$  соответственно, редокс-отношение  $[Redox]$ , средняя перфузия ткани кровью  $I_m$ , а также предложенный комплексный параметр, характеризующий интенсивность метаболических процессов – показатель метаболизма  $MR$ :

$$[Redox] = \frac{I_{NADH}}{I_{FAD}} \cdot \frac{I_{450}}{I_{365}}, \quad (1)$$

$$MR = \frac{[Redox]}{I_m}. \quad (2)$$



Рисунок 2 – Схема расположения волокон при проведении исследований

Для каждого исследования длительностью 5 мин все диагностические параметры усреднялись за 10 измерений.

Так как заранее известно разделение экспериментальных данных на классы (пациенты и контрольная группа), то был использован метод линейного дискриминантного анализа для определения дискриминантной функции, позволяющей синтезировать искомое решающее правило, которое позволит вновь появляющийся объект отнести к одному из этих классов на основании значений измеренных параметров (переменных). Основная идея заключается в том, чтобы определить, отличаются ли разные совокупности по среднему какой-либо переменной (или линейной комбинации переменных), и затем использовать эту переменную, чтобы предсказать для новых членов их принадлежность к той или иной группе [10, 11]. Оценка качества дискриминантного анализа была проведена с использованием ROC-кривой.

На первой стадии анализа экспериментальных данных было проведено сравнение результатов, полученных во всех точках двух ног отдельно для группы пациентов и отдельно для контрольной группы. Статистических различий (по критерию Манна–Уитни,  $p < 0,05$ ) для двух групп выявлено не было. Учитывая тот факт, что нарушения на начальных стадиях при диабете зачастую имеют зональный (гетерогенный) характер, можно говорить о высокой степени нарушений в биотканях пациентов, что согласуется с априорной информацией об их состоянии. Таким образом, было решено анализировать совокупности из 60 экспериментов ( $4 \times 15$ ) как для группы пациентов, так и для контрольной группы. Также была проверена и подтверждена по критерию Колмогорова–Смирнова гипотеза о нормальности распределения исследуемых выборок.

Первый этап экспериментальных исследований показал, что у больных СД наблюдаются повышенные значения нормированных амплитуд NADH и FAD. Подтверждена статистическая значимость различий (таблица 1, рисунок 3).

Для синтеза решающего правила в качестве анализируемых параметров предлагается использовать нормированные амплитуды флуоресценции коферментов (с позиций максимальной чувствительности к изменению физиологических показателей в сравнении с редокс-отношением) и перфузию. Предварительно было установлено, что эти параметры удовлетворяют принципам статистической независимости.

Таблица 1 – Результаты исследований

Параметр	Контроль	Диабет
Нормированная амплитуда $I_{NADH}$ , отн.ед.	$3,1 \pm 0,6$	$3,6 \pm 1,2^*$
Нормированная амплитуда $I_{FAD}$ , отн.ед.	$1,1 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,6^*$
Перфузия $I_m$ , пф.ед.	$6,0 \pm 2,6$	$6,6 \pm 2,4$
$[Redox]$ , отн.ед.	$3,1 \pm 0,6$	$2,1 \pm 0,4^*$
Показатель метаболизма $MR$ , отн.ед.	$0,6 \pm 0,3$	$0,4 \pm 0,1^*$

\* – Статистическая значимость различий подтверждена по критерию Манна–Уитни ( $p < 0.05$ )

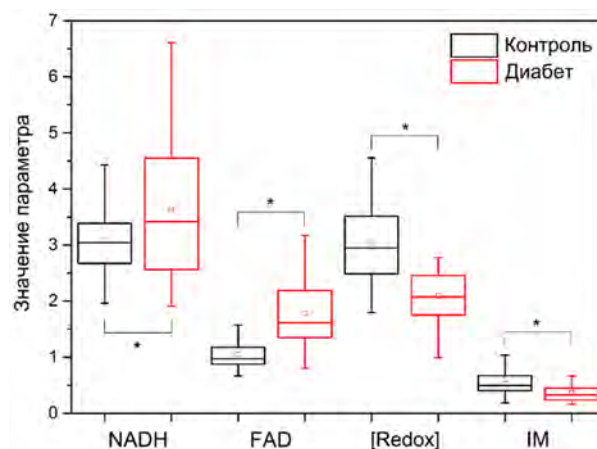


Рисунок 3 – Диаграмма размаха полученных параметров для двух групп. Центральная линия является медианой, края бокса – нижняя и верхняя квартили (25-я и 75-я)

На рисунке 4 представлены результаты проведенного линейного дискриминантного анализа. Средний уровень ошибки (среднее между ошибкой первого и второго рода) составил 15 %.

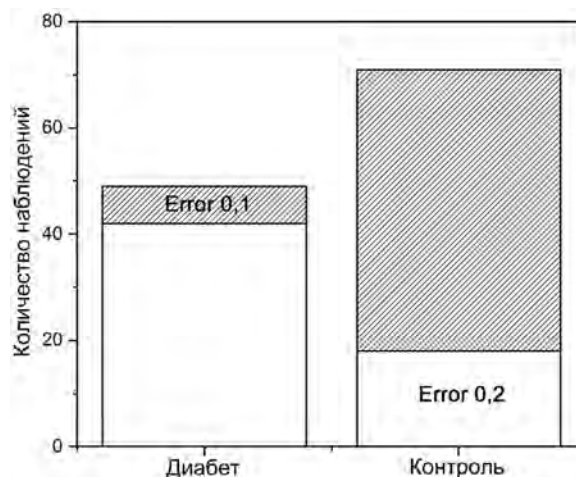
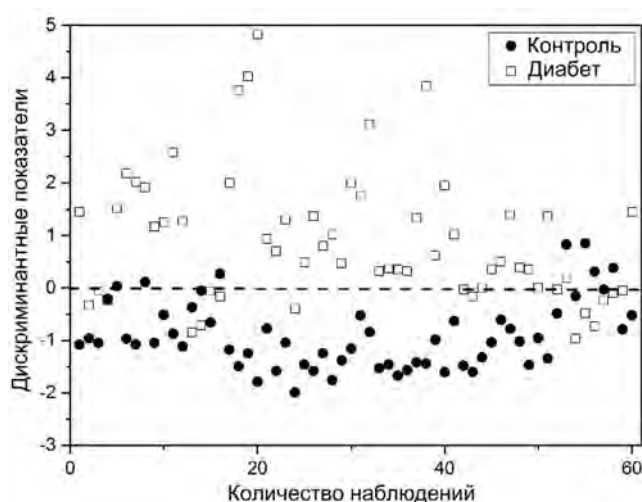


Рисунок 4 – Результаты линейного дискриминантного анализа. Пунктирная линия обозначает пороговое значение, представляющее собой средневзвешенное двух центроидов для каждой из групп

Тот факт, что экспериментальные данные могут быть сгруппированы, означает, что вариации показателей нарушения биоткани ткани от контрольной группы достаточно воспроизводимы и аналогичны у всех пациентов.

На рисунке 5 представлена ROC-кривая, вычисленная для полученной дискриминантной функции.

ROC-анализ предусматривает сравнение таких операционных характеристик правила, как чувствительность (доля волонтеров, которые верно отнесены правилом к первой группе) и специфичность (доля волонтеров, которые верно отнесены правилом ко второй группе).

Для сравнения качества различных классифицирующих правил удобно использовать интегральную характеристику AUC (Area Under Curve) – площадь под ROC-кривой.

Ситуация, при которой ROC–кривая совпадает с диагональю (в этом случае  $AUC=0,5$ ), соответствует случайному угадыванию, а решающее правило с такими характеристиками является бесполезным. Для идеального правила величина  $AUC=1$ , поэтому считается, что чем ближе  $AUC$  к единице, тем качественнее правило. В нашем случае  $AUC=0,93$ , что говорит о хорошем качестве модели классификации.

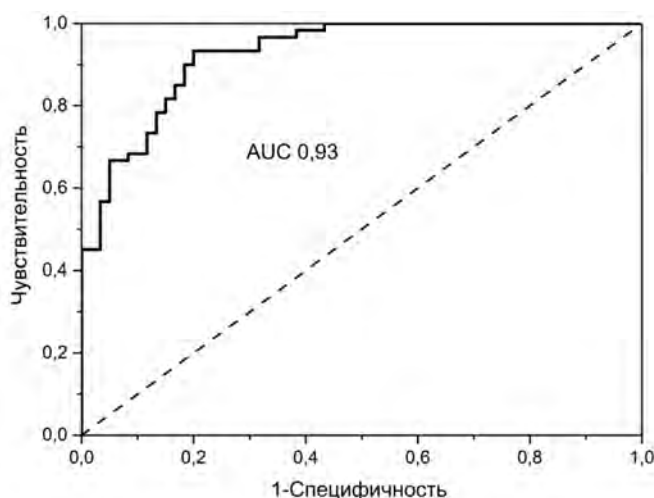


Рисунок 5 – ROC–кривая оценки эффективности дискриминантного анализа

Для уменьшения ошибки классификации видится перспективным проведение исследований с применением функциональных тестов для получения более достоверных различий и уменьшения ошибки. Так, тепловое локальное воздействие может помочь с большей точностью проводить дифференциацию наличия или отсутствия микроциркуляторно–тканевых нарушений.

Для практического применения при фоновых записях возможно использовать комплексный параметр  $MR$ , позволяющий дифференцировать состояние микроциркуляторного русла и метаболизма биоткани. При его применении появляется возможность анализировать кровоток и метаболические процессы, тесно взаимосвязанные друг с другом. Выбор данного параметра связан с фундаментальным принципом «доставки–потребления кислорода». Предложенный параметр представляет собой оценку баланса доставки крови (уровень перфузии) и потребления кислорода (амплитуды NADH и FAD). Так, средний уровень  $MR$  для исследованной группы пациентов составил  $0,4 \pm 0,1$  отн.ед., для контроля –  $0,6 \pm 0,3$  отн.ед.

Проведенные пилотные экспериментальные исследования позволяют выявлять нарушения нижних конечностей у пациентов с СД. Показана высокая чувствительность оптических неинвазивных методов (лазерной доплеровской флоуметрии и флуоресцентной спектроскопии) при их сочетанном применении для выявления нарушений в гемодинамических и метаболических процессах биоткани при СД.

Исследования на пациентах эндокринологического профиля показывают, что предложенный оригинальный подход может быть использован для диагностики нарушений микроциркуляторного русла и тканевого метаболизма в нижних конечностях пациентов на ранних стадиях, в том числе для уточнения патогенеза «диабетической стопы».

*Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ для ФГБОУ ВПО «Государственный университет–УНПК» (№310).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупаткин, А.И. Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно–тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: руководство для врачей / А.И. Крупаткин, В.В. Сидоров. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 496 с.
2. Dunaev, A.V. Individual variability analysis of fluorescence parameters measured in skin with different levels of nutritive blood flow / A.V. Dunaev, V.V. Dremin, E.A. Zhrebtssov, I.E. Rafailov, K.S. Litvinova, S.G. Palmer, N. A. Stewart, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // Journal Medical Engineering & Physics. – 2015. – 37 (6). – P. 574–583.

3. Rafailov, I.E. Computational model of bladder tissue based on its measured optical properties / I.E. Rafailov, V.V. Dremmin, K.S. Litvinova, A.V. Dunaev, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // Journal of Biomedical Optics. – 2016. – 21 (2). – P. 025006–025006.
4. Дунаев, А.В. Анализ индивидуальной вариабельности параметров в лазерной флуоресцентной диагностике / А.В. Дунаев, В.В. Дрёмин, Е.А. Жеребцов, С.Г. Палмер, С.Г. Соколовский, Э.У. Рафаилов // Биотехносфера. – 2013. – № 2 (26). – С. 39–47.
5. Оптическая биомедицинская диагностика: в 2 т. Т. 2 / Пер. с англ. под ред. В. В. Тучина. М.: Физматлит, 2007. – 368 с.
6. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin, I.E. Rafailov, S.G. Palmer, N.A. Stewart, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // Physiological Measurement. – 2014. – 35 (4). – P. 607–621.
7. Дрёмин, В.В. Влияние содержания меланина в коже на формирование сигнала флуоресцентной спектроскопии / В.В. Дрёмин, А.В. Дунаев // Оптический журнал. – 2016. – № 1 (83). – С. 57–64.
8. Bartolome, F. Measurement of mitochondrial NADH and FAD autofluorescence in live cells / F. Bartolome, A.Y. Abramov // Methods Mol Biol. – 2015. – 1264. – P. 263–270.
9. Mayevsky, A. Oxidation–reduction states of NADH in vivo: From animals to clinical use / A. Mayevsky, B. Chance // Mitochondrion. – 2007. – 7 (5). – P. 330–339.
10. Klecka, W.R. Discriminant Analysis // Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences. – 1980. – P. 07–019.
11. Lachenbruch, P.A. Discriminant Analysis // Biometrics. – 1979. – 35. – P. 69–85.

**Дрёмин Виктор Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Аспирант кафедры  
«Приборостроение, метрология и  
сертификация» учебно–научно–  
исследовательского института  
информационных технологий,  
стажер–исследователь научно–  
образовательного центра  
«Биомедицинская инженерия»  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E–mail: dremmin\_viktor@mail.ru

**Потапова Елена Владимировна**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Доцент кафедры  
«Приборостроение, метрология и  
сертификация» учебно–научно–  
исследовательского института  
информационных технологий,  
кандидат технических наук  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E–mail: elenasweet2007@gmail.com

**Жарких Елена Валерьевна**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Студентка кафедры  
«Приборостроение, метрология и  
сертификация» учебно–научно–  
исследовательского института  
информационных технологий,  
сотрудник студенческого  
конструкторского бюро  
биомедицинских инженерных  
исследований (СКБ БМИИ)  
научно–образовательного центра  
«Биомедицинская инженерия»  
Тел. +7 (4862) 41–98–76  
E–mail: loread@mail.ru

**Дрёмина Екатерина Вячеславовна**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Сотрудник научно–  
образовательного центра  
«Биомедицинская инженерия»  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E–mail: ichiebanienko@mail.ru

**Алимичева Елена Александровна**  
БУЗ Орловской области «ООКБ»,  
г. Орёл, Россия  
Заведующая отделением – врач–  
эндокринолог  
Тел.: +7–4862–46–59–50

**Масалыгина Галина Ивановна**  
БУЗ Орловской области «ООКБ»,  
г. Орёл, Россия  
Главный внештатный специалист  
эндокринолог  
Тел.: +7–4862–46–59–50

**Дунаев Андрей Валерьевич**  
ФГБОУ ВО «ПГУ», г. Орёл, Россия  
Ведущий научный сотрудник научно–образовательного центра «Биомедицинская инженерия», кандидат  
технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация» учебно–научно–  
исследовательского института информационных технологий  
Тел.: +7–4862–41–98–76  
E–mail: dunaev@bmecenter.ru

V.V. DREMIN, E.V. DREMINA, E.V. ZHARKIKH, E.V. POTAPOVA,  
E.A. ALIMICHEVA, G.I. MASALYGINA, A.V. DUNAEV

## POSSIBILITIES APPLICATION OF COMBINED METHODS OF OPTICAL NONINVASIVE DIAGNOSIS FOR TISSUE OF LOWER LIMBS VIABILITY STUDY IN PATIENTS WITH DIABETES

*The paper shows the possibility of using optical non–invasive diagnostic methods  
(fluorescence spectroscopy and laser Doppler flowmetry) in the study of patients with type 2 diabetes.  
Was held a series of experimental studies on 15 patients from the Endocrinology division, as well as*

*apparently healthy volunteers. Studies of the patients endocrinological profile show that the proposed original method can be used to diagnose disorders of the microvasculature and metabolism in the lower limbs of patients at the early stages of the disease and clarify the pathogenesis of «diabetic foot».*

**Keywords:** optical non-invasive diagnostics, fluorescence spectroscopy, laser Doppler flowmetry, system of blood microcirculation, metabolism.

## BIBLIOGRAPHY

1. Krupatkin, A.I. Funktsionalnaya diagnostika sostoyaniya mikrotsirkulyatorno–tkanevykh sistem: kolebaniya, informatsiya, nelineynost: rukovodstvo dlya vrachey / A.I. Krupatkin, V.V. Sidorov. – M.: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2013. – 496 s.
2. Dunaev, A.V. Individual variability analysis of fluorescence parameters measured in skin with different levels of nutritive blood flow / A.V. Dunaev, V.V. Dremmin, E.A. Zherebtsov, I.E. Rafailov, K.S. Litvinova, S.G. Palmer, N. A. Stewart, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // Journal Medical Engineering & Physics. – 2015. – 37 (6). – P. 574–583.
3. Rafailov, I.E. Computational model of bladder tissue based on its measured optical properties / I.E. Rafailov, V.V. Dremmin, K.S. Litvinova, A.V. Dunaev, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // Journal of Biomedical Optics. – 2016. – 21 (2). – P. 025006–025006.
4. Dunayev, A.V. Analiz individualnoy variabelnosti parametrov v lazernoy fluorestsentnoy diagnostike / A.V. Dunayev, V.V. Dromin, Ye.A. Zherebtsov, S.G. Palmer, S.G. Sokolovskiy, E.U. Rafailov // Biotekhnosfera. – 2013. – № 2 (26). – S. 39–47.
5. Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika: v 2 t. T. 2 / Per. s angl. pod red. V. V. Tuchina. M.: Fizmatlit, 2007. – 368 s.
6. Dunaev, A.V. Investigating tissue respiration and skin microhaemocirculation under adaptive changes and the synchronization of blood flow and oxygen saturation rhythms / A.V. Dunaev, V.V. Sidorov, A.I. Krupatkin, I.E. Rafailov, S.G. Palmer, N.A. Stewart, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // Physiological Measurement. – 2014. – 35 (4). – P. 607–621.
7. Dromin, V.V. Vliyaniye soderzhaniya melanina v kozhe na formirovaniye signala fluorestsentnoy spektroskopii / V.V. Dromin, A.V. Dunayev // Opticheskii zhurnal. – 2016. – № 1 (83). – S. 57–64.
8. Bartolome, F. Measurement of mitochondrial NADH and FAD autofluorescence in live cells / F. Bartolome, A.Y. Abramov // Methods Mol Biol. – 2015. – 1264. – P. 263–270.
9. Mayevsky, A. Oxidation–reduction states of NADH in vivo: From animals to clinical use / A. Mayevsky, B. Chance // Mitochondrion. – 2007. – 7 (5). – P. 330–339.
10. Klecka, W.R. Discriminant Analysis // Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences. – 1980. – P. 07–019.
11. Lachenbruch, P.A. Discriminant Analysis // Biometrics. – 1979. – 35. – P. 69–85.

### **Dremmin Victor Vladimirovich**

Prioksky State University, Oryol, Russia  
Postgraduate student degree of the Department «Instrumentation, metrology and certification» of Educational and Research Institute of Information Technology, Early stage researcher of scientific–educational center «Biomedical Engineering»  
Ph.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: dremmin\_viktor@mail.ru

### **Potapova Elena Vladimirovna**

Prioksky State University, Oryol, Russia  
PhD, Docent of the Department «Instrumentation, metrology and certification» of Educational and Research Institute of Information Technology  
Ph.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: elenasweet2007@gmail.com

### **Zharkikh Elena Valerievna**

Prioksky State University, Oryol, Russia  
Student of the Department «Instrumentation, metrology and certification», a member of the Student Design Bureau of Biomedical Engineering Research (SDB BMER) scientific and educational center «Biomedical Engineering»  
Ph.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: loread@mail.ru

### **Dremina Ekaterina Vyacheslavovna**

Prioksky State University, Oryol, Russia  
Employee of scientific–educational center «Biomedical Engineering»  
Ph.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: ichiebanienko@mail.ru

### **Alimicheva Elena Alexandrovna**

Endocrinology Department «Oryol Regional Clinical Hospital», Oryol, Russia  
Head of department – Endocrinologist  
Ph.: +7–4862 46–59–50

### **Masalygina Galina Ivanovna**

Endocrinology Department «Oryol Regional Clinical Hospital», Oryol, Russia  
Head Specialist Endocrinologist  
Ph.: +7–4862 46–59–50

### **Dunaev Andrey Valerievich**

Prioksky State University, Oryol, Russia  
Leading Research Fellow of scientific–educational center «Biomedical Engineering», PhD, Docent of the Department «Instrumentation, metrology and certification» of Educational and Research Institute of Information Technology  
Ph.: +7–4862–41–98–76  
E-mail: dunaev@bmecenter.ru



## КОНТРОЛЬ ГИБКИХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

*Статья посвящена основным принципам контроля герметичности гибких трубопроводов. Гибкие трубопроводы могут заполняться рабочими телами, в состав которых входят органические вещества в виде предельных углеводородов. Авторы предлагают метод определения утечек углеводородов, основанный на вспомогательной химической реакции с водным раствором брома и дальнейшей регистрации изменения оптической плотности индикаторного раствора.*

**Ключевые слова:** фотометрический метод, углеводороды, допустимые утечки, световой поток, оптическая плотность раствора, степень герметичности.

Темпы современного производства все быстрее набирают обороты. Качество труб, которые используются в разнообразных производственных процессах, должно соответствовать всем современным жестким требованиям. В настоящее время в России при создании инженерных коммуникаций широко используются гибкие трубопроводы. Отечественные и зарубежные производители предлагают потребителю очень большую номенклатуру труб из самых различных материалов. Для изготовления гибких трубопроводов в России чаще всего используют полимеры или нержавеющую сталь. Полиуретановые шланги условно проходным диаметром от 25 до 400 мм, предназначены для транспортировки топлива, нефти, нефтепродуктов, масел, химических продуктов, загрязненных вод, воды и сбора загрязнений. После окончания монтажа гибкий шланг необходимо проверить на протекание при рабочих давлении и температуре. Причинами утечки могут стать: пережатие прокладки в накидной гайке, недостаточная толщина прокладки в накидной гайке, несоответствие диаметра прокладки диаметру посадочного гнезда [1]. Проводить визуальный осмотр шланга рекомендуется через каждые шесть месяцев, так как при эксплуатации трубопроводов заводские дефекты могут привести к появлению сквозных трещин и разрывов. Если утечка вещества происходит в закрытом помещении, то возникает дополнительная необходимость контролировать его утечку [2], так как в воздухе рабочей зоны концентрация вредного вещества должна быть меньше предельно допустимой [3]. Поэтому обнаружение утечки рабочего вещества является актуальной задачей.

Проведенный анализ методов и средств поиска течей показал, что несмотря на большое разнообразие методов, которые существенно различаются по чувствительности, селективности, по принципам обнаружения утечки пробного вещества, по виду используемых при реализации пробных веществ, нет быстрого, надежного и не требующего дорогостоящего оборудования метода регистрации утечки органических соединений [4, 5].

Так как основным параметром, характеризующим метод контроля утечки, является предел обнаружения, то есть минимальное количество (поток или концентрация) вещества, которое можно обнаружить данным методом, рассчитаем максимально допустимую утечку рабочего вещества для гибких трубопроводов. Объемное количество, вытекающего газа при постоянной температуре, независимо от природы газа, определяется произведением его объема на давление, ( $\text{м}^3 \text{Па}$ ; л.мм.рт.ст.), то утечка газообразного вещества определяется в единицах  $\text{м}^3 \text{Па}$ , отнесенных к единице времени –  $\text{м}^3 \text{Па/с}$ , что соответствует размерности Ватт. Норма герметичности сосуда, аппарата в соответствии с [6], определяется как наибольший суммарный расход вещества через течи, обеспечивающий работоспособное состояние сосуда, аппарата и установленный нормативно-технической документацией на данный сосуд, аппарат. Норма герметичности измеряется в единицах газового потока (Ватт):

$$B = \frac{\Delta V}{\tau} P = \frac{\Delta P}{\tau} V, \quad (1)$$

где  $B$  – расход газа через сквозной микроканал,  $\text{м}^3 \text{Па/с}$ ;

$\frac{\Delta V}{\tau}$  – объемный расход газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

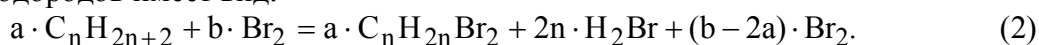
$P$  – давление в сосуде, Па;

$\frac{\Delta P}{\tau}$  – изменение давления в сосуде, Па/с;

$V$  – объем сосуда,  $\text{м}^3$ .

Рассчитанная норма негерметичности гибких трубопроводов, заполненных органической жидкостью или газом, составляет от  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$  Вт. Самый простой метод обнаружения течей – пузырьковый. О величине течи судят по размеру и скорости образования пузырьков газа, образованных в жидкости. В данном случае его чувствительность недостаточна. Надежный и высокочувствительный метод инфракрасной спектроскопии основанный на регистрации поглощения излучения в области спектра  $2700\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ , обусловленного валентными колебаниями  $\text{CH}_3$  и  $\text{CH}_2$  групп алифатических и алициклических соединений и боковых цепей ароматических углеводородов, требует дорогостоящего оборудования и высококвалифицированного персонала [7].

Предложенный метод контроля герметичности основан на вспомогательной химической реакции углеводорода с галогеном и последующей регистрации изменения оптической плотности раствора. При косвенном фотометрическом анализе количество вещества определяется по изменению интенсивности окраски или светопоглощения окрашенного раствора, в который введено детектируемое вещество [8]. Предельные углеводороды вступают в реакцию с галогенами, вследствие чего изменяется интенсивность окраски раствора, которая фиксируется фотометрическим методом. Реакция бромирования предельных углеводородов имеет вид:



При вступлении в реакцию (а) молей предельного углеводорода количество свободного брома в растворе уменьшится на  $(2a)$  молей. Это дает возможность по изменению количества  $\Delta N_6$  (моль) брома в растворе определить количество  $N_y$  предельного углеводорода, вступившего с ним в реакцию:

$$\Delta N_6 = 2\Delta N_y. \quad (3)$$

В качестве растворителя для брома могут быть использованы: этиловый спирт, четыреххлористый углеводород и вода. Для проведения большого числа измерений необходимо использовать самый дешевый и доступный растворитель, который является вода. Вода прозрачна для светового потока в диапазоне длин волн  $200\text{--}760\text{ нм}$ , ее собственная полоса поглощения светового потока  $167 \pm 2\text{ нм}$ . Растворимость брома в воде  $0,3\%$  в три раза превышает максимально допустимую концентрацию раствора для проведения фотометрических измерений (обычно экспериментальные исследования проводятся с концентрациями веществ, не превышающими  $0,1\%$ ). К тому же, как показали многочисленные исследования, в водных растворах галогенов почти не происходит смещения спектра поглощения. Поэтому для проведения реакции предельного углеводорода с бромом в качестве растворителя целесообразно использовать воду. Для диссоциаций брома, необходимо облучить его световым потоком с длиной волны не более  $628\text{ нм}$ , так как энергия кванта именно данного участка спектра соответствует энергии, необходимой для диссоциации молекул брома. Для диссоциаций брома, необходимо облучить его световым потоком с длиной волны не более  $628\text{ нм}$ , так как энергия кванта именно данного участка спектра соответствует энергии, необходимой для диссоциации молекул брома. Световые потоки разной интенсивности  $I_1$  и  $I_2$  (закон Бунзена и Роско), но с одинаковы произведение  $I_1 \times t_1$  и  $I_1 \times t_2$  (где  $t$  время облучения светом), произведут одинаковое фотохимическое воздействие. Поэтому мощность облучающего элемента для фотодиссоциации всего брома в растворе, рассчитывается по формуле:

$$G = C \cdot V_p \cdot K_{\Pi} \cdot t \cdot g, \quad (4)$$

где  $K_{\Pi}$  – коэффициент пропускания диспергирующего элемента;  
 $C$  – концентрация вещества.

Таким образом, при использовании светофильтра, пропускающего в данном диапазоне  $0,7\%$  светового потока, что составляет  $1/10$  часть мощности всего энергетического излучения, для диссоциации всего брома в данном растворе, за одну секунду потребуется источник света мощностью не менее  $7 \times 10^{-4}$  Вт. И так, при облучении раствора брома электромагнитным излучением, происходит его реакция с предельным углеводородом. В результате этой реакции изменяется количество свободного брома в растворе, а значит, уменьшается интенсивность его окраски, которая фиксируется фотометрическим методом. Согласно закону Бугера– Ламберта интенсивность пучка параллельных лучей при прохождении слоя среды толщиной  $z$  убывает, вследствие его поглощения:

$$\frac{J}{J_0} = e^{-az} = k_z, \quad (5)$$



где  $J_0, J$  – интенсивность световых потоков: падающего на слой вещества и прошедшего через слой вещества;

$\alpha$  – натуральный показатель поглощения на длине волны  $\lambda$ ;

$k_z$  – коэффициент пропускания слоя толщиной  $z$ .

Предлагается в практических расчетах пользоваться не натуральным, а десятичным показателем поглощения. Для определения количества ( $N$  моль) поглощающегося вещества в растворе измеряется оптической плотностью раствора, которая имеет пропорциональное значение его содержанию в растворе. Оптическая плотность раствора связана с коэффициентом пропускания следующим выражением:

$$D = \lg \frac{1}{k_z} = -\lg k_z = \alpha \cdot z. \quad (6)$$

В данном случае, растворитель не поглощает световой поток на данной длине волны и следовательно справедлив закон Бора:

$$D = \alpha \cdot z = \varepsilon \cdot C \cdot z. \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  – молярный коэффициент поглощения растворенного вещества на длине волны  $\lambda$ , м<sup>2</sup>/моль (л./моль·см), называемый коэффициентом экстинкции вещества;

$C$  – концентрация вещества в растворе, моль/м<sup>3</sup> (моль/л.);

$z$  – длина поглощения слоя, м (см).

Схема установки для определения степени герметичности стыков гибких шлангов представлена на рисунке 1. В ней контролируемую часть изделия 1 помещают в камеру накопления 2. Затем воздух из камеры накопления прокачивают насосом 3, через реакционную камеру 4, в которой находится индикаторный раствор. При загрязнении воздуха рабочей зоны углеводородами происходит реакция галогенного замещения, описанная уравнением (2), и оптическая плотность раствора брома  $D_1$  уменьшается, что фиксируется фотоэлектрическим прибором 5 и 6.

Затем изделие выдерживают в камере в течение времени  $t_n$ . При наличии в резервуаре утечки в камере накапливается определенная концентрация предельных углеводородов. Снова прокачивают воздух через реакционную камеру и измеряют оптическую плотность раствора  $D_2$ . Суммарная утечка предельного углеводорода из контролируемого изделия рассчитывается по формуле:

$$Q_y = \frac{(D_1 - D_2) \cdot V_P \cdot RT}{\varepsilon K_x t_H z}. \quad (8)$$

Так как время контроля составляет не более 5 мин и скорость химической реакции брома с металлом на три порядка меньше, чем с газом, то можно проводить испытания непосредственно опуская часть гибкого шланга в раствор реагента.

Изложенный в статье фотоэлектрический метод регистрации утечки, основанный на вспомогательной химической реакции обладает рядом достоинств:

- простота реализации способа измерения,
- небольшая себестоимость процесса измерения,
- необходимая и достаточная чувствительность обнаружения,
- технический персонал, проводящий контрольные измерения не требует высокой квалификации.

Учитывая преимущества метода, основанного на вспомогательной химической реакции и дальнейшей регистрации изменения оптической плотности индикаторного раствора, он может использоваться для контроля герметичности гибких трубопроводов, заполненных рабочими телами в виде жидкости или газа, в которых содержатся предельные углеводороды.

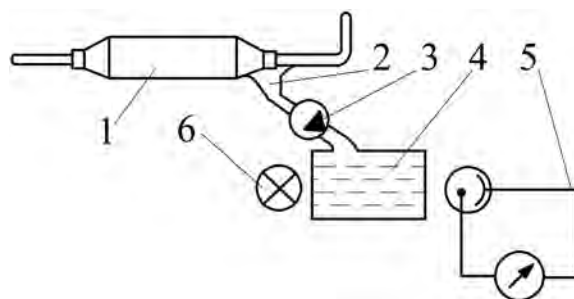


Рисунок 1 – Схема установки для определения степени герметичности стыков гибких трубопроводов:

1 – контролируемое изделие, 2 – камера накопления, 3 – прокачивающий насос, 4 – реакционная камера, 5 – фотоэлектрический прибор, 6 – источник света

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горин, А.В. Применение гидравлических машин ударного действия для образования скважин в грунтах / А.В.Горин, Д.Н. Ешуткин, М.А. Горина. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2015. – 151 с.
2. ГОСТ 12.1.007–76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2007. – 16 с.
3. ГОСТ 12.1.005–88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Стандартиформ, 2005. – 95 с.
4. Фроловский, П.Ф. Хромотография газов / П.Ф. Фроловский. – М.: Недра, 1996. – 181 с.
5. Бударин, Л.И. Химические методы испытания изделий на герметичность / Л.И. Бударин, К.С. Касаев. – Киев: Академия наук Украинской ССР, 1991. – 232 с.
6. ГОСТ 26790–85. Техника течеискания. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2004. – 8 с.
7. Булатов, М.И. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа / М.И. Булатов, И.П. Калинин. – Ленинград: Химия, 1979. – 246 с.
8. Горин, А.В. Проверка изделий, заполненных предельными углеводородами, на герметичность: монография / А.В. Горин, Е.Н. Грядунцова, М.А. Горина. – Орел: ООО ПФ «Картуш», 2016. – 98 с.

**Горина Мария Андреевна**  
ФГБОУ ВО «Приокский  
государственный университет»,  
г. Орел  
Студент  
Россия, 302020, г. Орел,  
Наугорское ш., д. 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Грядунцова Елена Николаевна**  
ФГБОУ ВО «Приокский  
государственный университет»,  
г. Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Техническая  
механика и инженерная графика»  
Россия, 302020, г. Орел,  
Наугорское ш., д. 29  
E-mail: gryadunova65@mail.ru

**Горин Андрей Владимирович**  
ФГБОУ ВО «Приокский  
государственный университет»,  
г. Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Техническая  
механика и инженерная графика»  
Россия, 302020, г. Орел,  
Наугорское ш., д. 29  
E-mail: gorin57@mail.ru

M.A. GORINA, Ye.N. GORBUNOVA, A.V. GORIN

## CONTROLLER FLEX LEAK

*The article is devoted to the basic principles of the control of tightness of flexible piping. Flexible pipes are filled with the working fluid, which contain organic substances in the form of limiting Carbs-boons. The authors suggest the use of photometric method definition of hydrocarbon leaks in flexible pipes. Photometric method poses it possible to determine the leakage of a small volume of hydrocarbons.*

**Keywords:** photometric method, hydrocarbons allowable leakage light flux, the optical density of the solution, the degree of tightness.

## BIBLIOGRAPHY

1. Gorin, A.V. Primeneniye gidravlicheskih mashin udarnogo deystviya dlya obrazovaniya skvazhin v gruntakh / A.V.Gorin, D.N. Yeshutkin, M.A. Gorina. – Orel: Gosuniversitet – UNPK, 2015. – 151 s.
2. GOST 12.1.007–76. Sistema standartov bezopasnosti truda. Vrednyye veshchestva. Klassifikatsiya i obshchiye trebovaniya bezopasnosti. – M.: Standartinform, 2007. – 16 s.
3. GOST 12.1.005–88. Sistema standartov bezopasnosti truda. Obshchiye sanitarno-gigiyenicheskiye trebovaniya k vozdukhу rabochey zony. – M.: Standartinform, 2005. – 95 s.
4. Frolovskiy, P.F. Khromotografiya gazov / P.F. Frolovskiy. – M.: Nedra, 1996. – 181 s.
5. Budarin, L.I. Khimicheskiye metody ispytaniya izdeliy na germetichnost / L.N. Budarin, K.S. Kasayev. – Kiyev: Akademiya nauk Ukrainskoy SSR, 1991. – 232 s.
6. GOST 26790–85. Tekhnika techeiskaniya. Terminy i opredeleniya. – M.: Standartinform, 2004. – 8 s.
7. Bulatov, M.I. Prakticheskoye rukovodstvo po fotometricheskim metodam analiza / M.I. Bulatov, I.P. Kalinkin. – Leningrad: Khimiya, 1979. – 246 s.
8. Gorin, A.V. Proverka izdeliy, zapolnennykh predelnymi uglevodorodami, na germetichnost: monografiya / A.V. Gorin, Ye.N. Gryadunova, M.A. Gorina. – Orel: ООО ПФ «Kartush», 2016. – 98 s.

**Gorina Maria Andreevna**  
FSBEI HE Prioksky State University,  
Orel  
Student  
Naugorskoye shosse 29, Orel, Russia,  
302020  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Griadyanova Elena Nikolaevna**  
FSBEI HE Prioksky State University,  
Orel  
Candidate Science Technic, the senior  
lecturer of faculty «Theoretical  
mechanics and engineering graphics»  
Naugorskoye shosse 29, Orel, Russia,  
302020  
E-mail: gryadunova65@mail.ru

**Gorin Andrei Vladimirovich**  
FSBEI HE Prioksky State University,  
Orel  
Candidate Science Technic, the senior  
lecturer of faculty «Theoretical  
mechanics and engineering graphics»  
Naugorskoye shosse 29, Orel, Russia,  
302020  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Уважаемые авторы!**  
**Просим Вас ознакомиться с основными требованиями**  
**к оформлению научных статей**

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 4 до 10 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.

- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).

- Водном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.

- Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее, левое, правое – 2 см, нижнее – 1,6 см, переплет – 0. Отступы до колонтитулов: верхнего – 1,25 см, нижнего – 0,85 см. Текст набирается в одну колонку, шрифт – Times New Roman, 12 пт. Отступ первой строки абзаца – 1,25 см. Выравнивание – по ширине. Междустрочный интервал – единичный. Включить автоматический перенос. Все кавычки должны быть угловыми (« »). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–», а не «-»). Начертание цифр (арабских, римских) во всех элементах статьи – прямое (не курсив).

- Структура статьи:

УДК:

Список авторов на русском языке – **12 пт, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** в формате И.О. ФАМИЛИЯ **по центру без абзацного отступа**;

Название (не более 15 слов) на русском языке – **14 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**;

Аннотация (не менее 200–250 слов) на русском языке – **10 пт, курсив**;

Ключевые слова на русском языке (не менее 3 слов или словосочетаний) – **10 пт, курсив**;

Текст статьи:

Список литературы (в порядке цитирования, ГОСТ 7.1–2003) на русском языке, заглавие списка литературы – **12 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**, литература оформляется **10 пт**.

Сведения об авторах на русском языке – **10 пт**. Приводятся в такой последовательности:

Фамилия, имя, отчество;

учреждение или организация;

ученая степень, ученое звание, должность;

адрес;

телефон;

электронная почта.

- Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы (транслитерация) и сведения об авторах **обязательно дублируются на английском языке ЗА СТАТЬЕЙ**.

- Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Размер символов: обычные – **12 пт**, крупный индекс – **9 пт**, мелкий индекс – **7 пт**. Нумерация формул – по правому краю в круглых скобках «( )». Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается **с новой строки** в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

- Рисунки – черно-белые. Если рисунок создан средствами MS Office, необходимо преобразовать его в картинку. Для растровых рисунков разрешение не менее 300 dpi. Подрисуточные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

- Рисунки с подрисуточной подписью, формулы, выравниваются **по центру без абзацного отступа**.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте **www.gu-unpk.ru**.

**Плата за опубликование статей не взимается.**

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

*Адрес учредителя:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 42–00–24  
Факс (4862) 41–66–84  
www.gu-unpk.ru  
E-mail: unpk@ostu.ru

*Адрес редакции:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 54–15–19, 55–55–24, +7(906)6639898, 41–98–48, 41–98–03

www.gu-unpk.ru  
E-mail: tiostu@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.  
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 16.03.2016 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 9,25.  
Тираж 600 экз.  
Заказ №48/16П1

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.