

## **ԲԱՆԲԵՐ**

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՃԱՐՏԱՐԱԳԻՏԱԿԱՆ  
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ

**Սերիա** ՄԵԽԱՆԻԿԱ, ՄԵՔԵՆԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ,  
ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

**Թողարկում** 17

**№** 1

Երևան 2014

---

## **ВЕСТНИК**

ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНЖЕНЕРНОГО  
УНИВЕРСИТЕТА АРМЕНИИ

**Серия** МЕХАНИКА, МАШИНОВЕДЕНИЕ,  
МАШИНОСТРОЕНИЕ

**Выпуск** 17

**№** 1

Ереван 2014

---

## **PROCEEDINGS**

OF STATE ENGINEERING UNIVERSITY  
OF ARMENIA

**Series** MECHANICS, MACHINE SCIENCE,  
MACHINE-BUILDING

**Issue** 17

**№** 1

Yerevan 2014

**Հանդեսը հրատարակվում է 1998 թվականից, սերիան՝ 2012 թ.**

**Բանբերի խմբագրական խորհուրդ.** Յու.Լ. Սարգսյան (գլխավոր խմբագիր, տ.գ.դ.), Հ.Ա. Թերզյան (գլխավոր խմբագրի տեղակալ, տ.գ.դ.), Ա.Խ. Գրիգորյան (գլխավոր խմբագրի տեղակալ, տ.գ.դ.), Ա.Գ. Ավետիսյան (պատասխանատու քարտուղար, տ.գ.դ.), Ս.Գ. Աղբալյան (տ.գ.դ.), Մ.Ք. Բաղդասարյան (տ.գ.դ.), Ն.Բ. Կնյազյան (տ.գ.դ.), Ս.Հ. Սիմոնյան (տ.գ.դ.), Ս.Շ. Խրիստաֆորյան (տ.գ.դ.)

**Սերիայի խմբագրական խորհուրդ.** Ս.Շ. Խրիստաֆորյան (սերիայի գլխավոր խմբագիր, տ.գ.դ.), Մ.Գ. Հարությունյան (սերիայի գլխավոր խմբագրի տեղակալ, տ.գ.թ.), Ա.Ս. Առուստամյան (սերիայի պատասխանատու քարտուղար, տ.գ.թ.), Վ.Հ. Առաքելյան (տ.գ.դ., Ֆրանսիա), Ա.Կ. Ամիրյան (տ.գ.դ.), Բ.Ս. Բալասանյան (տ.գ.դ.), Ա.Գ. Խառատյան (տ.գ.թ.), Ա.Ն. Միխայլով (տ.գ.դ., Ուկրաինա), Գ.Վ. Մուսայելյան (տ.գ.թ.), Ա.Ռ. Պապոյան (տ.գ.դ.), Գ.Լ. Պետրոսյան (տ.գ.դ.), Մ.Գ. Ստակյան (տ.գ.դ.), Հ.Գ. Շեկյան (տ.գ.դ.), Լ.Ա. Շեկյան (Ֆ-մ.գ.դ.)

Խմբագիրներ՝ Ժ.Ս. Սեյրանյան, Հ.Ց. Պետրոսյան, Հ.Ջ. Ղազարյան

© Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարան (ՀՊՃՀ)  
«Ճարտարագետ» հրատարակչություն, հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան 105, ՀՊՃՀ  
banber.seua.am

---

**Журнал издается с 1998 г., серия – с 2012 г.**

**Редакционная коллегия Вестника:** Ю.Л. Саркисян (главный редактор, д.т.н.), А.А. Терзян (зам. главного редактора, д.т.н.), А.Х. Григорян (зам. главного редактора, д.т.н.), А.Г. Аветисян (ответственный секретарь, д.т.н.), С.Г. Агбальян (д.т.н.), М.К. Багдасарян (д.т.н.), Н.Б. Князян (д.т.н.), С.О. Симонян (д.т.н.), С.Ш. Христафорян (д.т.н.)

**Редакционная коллегия серии:** С.Ш. Христафорян (главный редактор серии, д.т.н.), М.Г. Арутюнян (зам. главного редактора серии, к.т.н.), А.М. Арустамян (ответственный секретарь серии, к.т.н.), А.К. Амирян (д.т.н.), В.А. Аракелян (д.т.н., Франция), Б.С. Баласанян (д.т.н.), А.Н. Михайлов (д.т.н., Украина), Г.В. Мусаелян (к.т.н.), А.Р. Папоян (д.т.н.), Г.Л. Петросян (д.т.н.), М.Г. Стакян (д.т.н.), А.Г. Харатян (к.т.н.), Г.Г. Шекиян (д.т.н.), Л.А. Шекиян (д.ф.-м.н.)

Редакторы: Ж.С. Сейранян, А.Ц. Петросян, А.З. Казарян

© Издательство Государственного инженерного университета Армении (ГИУА) “Чартарагет”,  
Адрес: 0009, Ереван, ул. Теряна 105, ГИУА  
vestnik.seua.am

---

**The journal has been published since 1998, the Series since 2012**

**Editorial Council of Proceedings:** Yu.L. Sarkissyan (Editor-in-chief, doctor of tech. sciences), H.A. Terzyan (vice Editor-in-chief, doctor of tech. sciences), A.Kh. Grigoryan (vice Editor-in-chief, doctor of tech. sciences), A.G. Avetisyan (responsible secretary, doctor of tech. sciences), S.G. Aghbalyan (doctor of tech. sciences), M.K. Baghdasaryan (doctor of tech. sciences), N.B. Knyazyan (doctor of tech. sciences), S.H. Simonyan (doctor of tech. sciences), S. Sh. Khristaphoryan (doctor of tech. sciences)

**Editorial Council of the series:** S.Sh. Khristaforyan (Editor-in-chief of the Series, doctor of tech. sciences), M.G. Harutyunyan (vice Editor-in-chief of the Series, cand. of tech. sciences), A.M. Arustamyan (responsible secretary of the series, cand. of tech. sciences), B.H. Arakelyan (doctor of tech. sciences, France), A.K. Amiryanyan (doctor of tech. sciences), B.S. Balasanyan (doctor of tech. sciences), A.G. Kharatyan (cand. of tech. sciences), A.N. Mikhailov (doctor of tech. sciences, the Ukraine), G.V. Musayelyan (cand. of tech. sciences), A.R. Papoyan (doctor of tech. sciences), G.L. Petrosyan (doctor of tech. sciences), M.G. Stakyan (doctor of tech. sciences), H.G. Shekyan (doctor of tech. sciences), L.A. Shekyan (doctor of phys.-math. sciences)

Editors: Zh. S. Seyranyan, H.Ts. Petrosyan, H.Z. Ghazaryan

© State Engineering University of Armenia (SEUA) “Tchartaraget” Publishing House  
Address: 0009, Yerevan, 105 Teryan, SEUA  
proceedings.seua.am

ISSN 1829-3387

## ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆ

Խմբագրի կողմից	6
----------------	---

## ՄԵԽԱՆԻԿԱ

<b>Ավետիսյան Ա.Ս., Քամայան Ա.Ա.</b> Պիեզոդիէլեկտրիկական շերտի անհամասեռության և եզրային պայմանների համակցությունների ազդեցությունը սահքի էլեկտրաառաձգական ալիքի տարածման վրա	9
<b>Հարությունյան Լ.Ա., Սաղաթեյան Մ.Ք.</b> Առաձգականության տեսության խնդիրներ ճաքեր պարունակող բաղադրյալ հարթության համար	26

## ՄԵՔԵՆԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ

<b>Գևորգյան Հ.Ա.</b> Փոփոխական երկարությամբ առաձգական օղակներով մեխանիզմների դինամիկական մոդելավորում	34
<b>Շեկյան Հ.Գ., Գևորգյան Վ.Ռ., Կլեոնին ՈՒ.</b> Պտտտակային գլանական սեղմման զսպանակի ծայրային գալարի հոգնածային մաշվածությունը առանցքային ցիկլիկ բեռնվածության դեպքում	42
<b>Դարբինյան Հ.Վ., Սեբեր Բ.Պ., Դարբինյան Վ.Հ.</b> Պայմանական մեխանիզմների կառուցումը սևեռող բնօրինակ տափաշտրթի հատկությունների վերլուծության համար	52

## ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

<b>Խրիստաֆորյան Ա.Շ., Քրիստափորյան Է.Ս., Արշակյան Ա.Լ.</b> Շփման մակերևույթների վրա շփատեխնիկական կառուցվածքների ձևավորման հատուկ տեխնոլոգիաներ	62
<b>Բալասանյան Բ.Ս., Մայրանյան Ա.Գ., Բալասանյան Ա.Բ., Հակոբյան Խ.Ն.</b> Ջրում յուղի գերծայնային էմուլցացման գործընթացի ճգրտված մեխանիզմ	77
<b>Փարիկյան Ֆ.Հ., Բաբայան Ա.Ս.</b> Գազային միջավայրերի ազդեցությունը կտրող գործիքի մաշման գործընթացի վրա	86
<b>Արթունյան Ա.Վ., Վարդազարյան Ջ.Վ.</b> Գերծայնային տատանումների կիրառմամբ մամլման դեպքում մամլվածքների խտության վրա ակտիվ շփման ուժերի ազդման տևողության ազդեցության մասին	94

## ՏՐԱՆՍՊՈՐՏԱՅԻՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐ

<b>Երիցյան Գ.Ս.</b> Ավտոմոբիլի արգելակային մեխանիզմի արդյունավետության կախվածությունը շփվող զույգի հայման մակերևույթի ձևից	100
<b>Տեղեկատվական նյութեր</b>	106
<b>Հեղինակների ցուցակ</b>	111
<b>Հոդվածների ձևավորման կանոնները</b>	114

## СОДЕРЖАНИЕ

От редактора	7
--------------	---

### МЕХАНИКА

<b>Аветисян А.С., Камалян А.А.</b> Влияние поперечной неоднородности пьезодиэлектрического слоя и сочетаний граничных условий на распространение сдвигового электроупругого сигнала	9
<b>Арутюнян Л.А., Сагателян М.К.</b> Задачи теории упругости для составной плоскости с трещинами	26

### МАШИНОВЕДЕНИЕ

<b>Геворкян Г.А.</b> Динамическое моделирование механизмов с упругими звеньями переменной длины	34
<b>Шекян Г.Г., Геворкян В.Р., Клетцин У.</b> Усталостный износ концевой витка винтовой цилиндрической пружины сжатия при осевом циклическом нагружении	42
<b>Дарбинян Г.В., Себер Б.П., Дарбинян В.Г.</b> Построение условных механизмов для анализа свойств оригинальных запирающих пассатижей	52

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<b>Христафорян С.Ш., Христафорян Э.С., Аршакян А.Л.</b> Специальные технологии формирования триботехнических структур на поверхностях трения	62
<b>Баласанян Б.С., Маляренко А.Д., Баласанян А.Б., Акопян Х.Н.</b> Уточненный механизм процесса ультразвукового эмульгирования масла в воде	77
<b>Парикян Ф.А., Бабаян А.С.</b> Влияние газовых сред на процесс изнашивания режущего инструмента	86
<b>Артунян А.В., Вартазарян З.В.</b> Влияние длительности действия сил активного трения на плотность прессовок при прессовании с применением ультразвуковых колебаний	94

### ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

<b>Ерицян Г.С.</b> Зависимость эффективности тормозного механизма автомобиля от формы контактной поверхности трущихся пар	100
<b>Информационные материалы</b>	106
<b>Список авторов</b>	112
<b>Правила оформления статей</b>	115

## CONTENT

<b>Editorial</b>	8
------------------	---

## MECHANICS

<b>Avetisyan A. S., Kamalyan A.A.</b> The Influence of Cross Inhomogeneity of Piezoelectric Layer and Combinations of Boundary Conditions on the Shear Electroelastic Signal Propagation	9
<b>Harutyunyan L.A., Saghatelyan M.K.</b> Problems of the Elasticity Theory for a Compound Plane with Cracks	26

## MACHINE SCIENCE

<b>Gevorgyan H.A.</b> Dynamic Modeling of Mechanisms with Elastic Links of Variable Length	34
<b>Shekyan H.G., Gevorgyan V.R., Klettsin U.</b> Fatigue Wear of a Tail–Piece of a Helical Cylindrical Compression Spring at Axial Cyclic Loading	42
<b>Darbinyan H.V., Seber B.P., Darbinyan V.H.</b> Virtual Mechanisms for Feature Analysis of Viper Grip Locking Pliers	52

## MACHINE-BUILDING

<b>Khristaforyan S.Sh., Khristaforyan E.S., Arshakyan A.L.</b> Special Technologies for Forming Tribotechnical Structures on Friction Surfaces	62
<b>Balasanyan B.S., Malyarenko A.D., Balasanyan A.B., Hakobyan Kh.N.</b> A Refined Mechanism for the Process of Ultrasonic Emulsification of Oil in Water	77
<b>Parikyan F.A., Babayan A.S.</b> The Gaseous Media Influence on the Cutting Tool Wear Process	86
<b>Artunyan A.V., Vartazaryan Z.V.</b> The Influence of Active Friction Operation Force Duration on the Density of Compacts Compressed under Ultrasonic Vibrations	94

## TRANSPORT SYSTEMS

<b>Yeritsyan G.S.</b> Dependence of the Automobile Brake Gear Efficiency on the Form of the Contact Surface of Friction Pairs	100
<b>Information materials</b>	106
<b>List of the authors</b>	113
<b>Rules for preparing the manuscripts</b>	116

## Խմբագրի կողմից

**ՀՊՃՀ «Բանբեր» ամսագրի «Մեխանիկա, մեքենագիտություն, մեքենաշինություն»** սերիայի սույն համարը նվիրված է ժամանակակից տեխնիկայի և մեքենաշինական տեխնոլոգիաների տեսության և նախագծման զարգացման մի շարք հարցերի: Ներկայացված նյութերը շոշափում են ժամանակակից արտադրության բավականին ուշագրավ հիմնախնդիրները, զարգացնում տեսական հարցեր. դրանք հրատարակվում են առաջին անգամ: Ակնարկային հոդվածում ամփոփված են շփատեխնիկական կառուցվածքներով գերճշգրիտ մեքենամասերի մակերևույթների մշակման տեխնոլոգիաների և սարքավորումների առանձնահատկությունների և մակերևույթների կառուցվածքավորման նոր տեխնոլոգիաների հիմնահարցեր՝ մշակված Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանում:

Սերիայի սույն համարը նվիրված է Հայաստանի ճարտարագիտական կադրերի դարբնոցի՝ Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանի (Պոլիտեխնիկ) մեխանիկամեքենաշինական ֆակուլտետի հիմնադրման 70-ամյակին: Խմբագրական խորհուրդը տեղեկացնում է, որ հոբելյանական ծրագրով, ի թիվս այլ միջոցառումների, նախատեսվում է միջազգային գիտատեխնիկական համագումար՝ «Մեքենաշինական տեխնոլոգիաներ և ավտոմատացման տեխնիկա – 2014» խորագրով: Հրավիրում ենք հանրապետության գիտնականներին և արդյունաբերողներին՝ մասնակցելու հանդիսավոր միջոցառումներին, գիտաժողովին, նաև ամսագրի հաջորդ համարի ձևավորմանը:

*Սերիայի գլխավոր խմբագիր՝ Ս.Շ. Խրիստաֆորյան*

## От редактора

Настоящий номер **Вестника ГИУА - Серия “Механика, машиноведение машиностроение”** посвящен ряду вопросов развития теории и проектирования современной техники и машиностроительных технологий. Представленные материалы затрагивают весьма интересные проблемы современного производства, развивают вопросы теории и публикуются впервые. Обзорная статья посвящена анализу особенностей технологии и оборудования для обработки сверхточных поверхностей с триботехническими структурами, а также вопросам разработанной в Государственном инженерном университете Армении (Политехник) новой технологии структурирования поверхностей.

Редакционная коллегия информирует, что настоящий номер серии посвящен славному юбилею – 70-летию основания Механико-машиностроительного факультета, кузницы инженерных кадров РА - Государственного инженерного университета Армении (Политехник). В программе мероприятий предусмотрено проведение Международной научно-технической конференции “Машиностроительные технологии и техника автоматизации - 2014”. Приглашаем ученых и производителей РА участвовать в торжественных мероприятиях, в работе конференции и формировании следующего номера журнала.

*Главный редактор серии С.Ш. Христафорян*

## **Editorial**

The present issue of the **Proceedings of SEUA - Series “Mechanics, Machine Science, Machine-building”** is devoted to a number of issues of the theory and design of modern equipment and technologies of machine-building. The materials introduced touch upon very actual problems of modern industrial production, develop theory issues, and are published for the first time. The review article is devoted to the analysis of specific features of technology and equipment for processing high-precision surfaces with tribotechnical structures, as well as to the issues concerning the new surface structuring technology developed in SEUA.

The Editorial Board informs that this issue of the Series is dedicated to the glorious 70-th anniversary of establishment of the Mechanical Engineering Faculty of State Engineering University of Armenia (Polytechnic) – a forge of the mechanical engineering staff of RA. The program of activities will include an International Scientific Conference “Manufacturing Engineering and Automation Techniques – 2014”. We invite the scientists and industrialists of RA to participate in these events and the conference, and support the formation of the next number of the journal.

*Editor-in-Chief of the Series S.Sh. Khristaforyan*



УДК 539.3

**ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ  
ПЬЕЗОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ И СОЧЕТАНИЙ ГРАНИЧНЫХ  
УСЛОВИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СДВИГОВОГО  
ЭЛЕКТРОУПРУГОГО СИГНАЛА**

**А.С. Аветисян<sup>1</sup>, А.А. Камалян<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт механики НАН Республики Армения

<sup>2</sup>Ереванский государственный университет

Рассматривается выявление качественных эффектов в случае распространения монохроматического электроупругого сигнала в пьезокерамическом, диэлектрическом и по толщине неоднородных слоях при различных граничных условиях на поверхностях слоя в отличие от случая распространения такого же сигнала в однородном слое.

**Ключевые слова:** электроупругий сдвиговой волновой сигнал, неоднородный пьезодиэлектрический слой, характер распределения волны по толщине слоя.

**Введение.** В работе представлена модель распространения монохроматической волны в пьезодиэлектрическом слое с функциональной неоднородностью материала слоя по толщине (пьезокристалл класса 6 мм) при нескольких типах граничных условий электроупругого поля на поверхностях слоя. Для каждой группы граничных условий приведены дисперсионные уравнения и исследована возможность существования поверхностной волны. Приведены результаты численного анализа.

**1. Постановка классической задачи.** Приведем основные соотношения линейной электроупругости для случая, когда исследуется возможность распространения сдвиговой поверхностной электроупругой монохроматической волны вдоль оси  $Ox$  в пьезоэлектрическом слое гексагональной симметрии (класса 6 мм), которая занимает в прямоугольной системе координат  $(x; y; z)$  область  $-\infty < x < \infty; 0 \leq y \leq 2h; -\infty < z < \infty$ .

Уравнения антиплоского электроупругого состояния для однородного материала данной симметрии записываются в виде

$$C_{44}^0 \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial x^2} + C_{44}^0 \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial y^2} + e_{15}^0 \frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial x^2} + e_{15}^0 \frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial y^2} = \rho \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial t^2}, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{\varphi}}{\partial y^2} = \frac{e_{15}^0}{\varepsilon_{11}^0} \left( \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial x^2} + C_{44}^0 \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial y^2} \right), \quad (1.2)$$

где  $C_{44}^0$  – модуль сдвига;  $e_{15}^0$  – пьезоэлектрический модуль;  $\varepsilon_{11}$  – диэлектрическая проницаемость;  $\rho_0$  – плотность пьезодиэлектрического материала.

При этом касательные напряжения  $\tilde{\sigma}_{xz}$ ,  $\tilde{\sigma}_{yz}$ , возникающие при антиплоской электроактивной деформации, равны

$$\tilde{\sigma}_{xz} = C_{44}^0 \frac{\partial \tilde{W}}{\partial x} + e_{15}^0 \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x}, \quad \tilde{\sigma}_{yz} = C_{44}^0 \frac{\partial \tilde{W}}{\partial y} + e_{15}^0 \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial y}, \quad (1.3)$$

а компоненты индукции  $\tilde{D}_x$ ,  $\tilde{D}_y$  электрического поля в однородном пьезоэлектрике:

$$\tilde{D}_x = e_{15}^0 \frac{\partial \tilde{W}}{\partial x} - \varepsilon_{11}^0 \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial x}, \quad \tilde{D}_y = e_{15}^0 \frac{\partial \tilde{W}}{\partial y} - \varepsilon_{11}^0 \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial y}. \quad (1.4)$$

Характерная электроупругая монохроматическая волна, распространяющаяся вдоль оси  $Ox$  в пьезоэлектрическом слое, представляется в виде

$$\begin{aligned} \tilde{W}(x, y, t) &= (A_1 \sinh(k\tilde{\alpha}y) + A_2 \cosh(k\tilde{\alpha}y)) \exp i(kx - \omega t), \\ \tilde{\varphi}(x, y, t) &= \left( \frac{e_{15}^0}{\varepsilon_{11}^0} [A_1 \sinh(k\tilde{\alpha}y) + A_2 \cosh(k\tilde{\alpha}y)] + A_3 \sinh(ky) + \right. \\ &\quad \left. + A_4 \cosh(ky) \right) \exp i(kx - \omega t), \end{aligned} \quad (1.5)$$

где  $\tilde{\alpha} = (1 - \eta)^{1/2}$  – характеристическое волновое число по толщине слоя;  $\eta = \omega^2 (kC_t)^{-2}$  – относительная сдвиговая скорость;  $C_t^2 = \tilde{C}_{44} \rho_0^{-1}$  – скорость объемной бесдисперсионной сдвиговой волны в среде;  $\tilde{C}_{44} = C_{44}^0 (1 + \chi_0)$  – приведенная сдвиговая жесткость материала;  $\chi_0 = \frac{e_{15}^0{}^2}{C_{44}^0 \varepsilon_{11}^0}$  – коэффициент электромеханической связи материала;  $\eta$  – безразмерная характеристика относительной фазовой скорости распространяющейся волны, которая при локализации вдоль поверхностей пьезослоя должна удовлетворять условию затухания интенсивности волны по глубине слоя:

$$0 < \eta < 1. \quad (1.6)$$

Величина коэффициента электромеханической связи пьезодиэлектрической среды всегда имеет определяющую роль при выявлении существования волн и расчете их скоростей.

В табл.1 приведены физико-механические характеристики и величины коэффициентов электромеханической связи некоторых пьезокерамических материалов класса 6 мм.

Таблица 1

Коэффициенты электромеханической связи

Физико-математические характеристики	CdS- $\chi_1$ [1]	ZnO- $\chi_2$ [2]	PZT-7- $\chi_3$ [3]	PZT-5H- $\chi_4$ [4]	PZT-4- $\chi_5$ [2]
$C_{44} \cdot 10^{10} \text{H/M}^2$	1,49	4,25	2,5	2,3	2,56
$\rho \cdot 10^3 \text{кг/м}^3$	4,82	5,68	7,8	7,5	7,5
$e_{15} \cdot \text{Кл/м}^2$	-0,21	-0,59	13,5	-17,0	12,7
$\varepsilon_{11} \cdot 10^{-11} \text{Ф/м}$	7,99	7,38	1710	22,71	6,45
$C_t \cdot \text{м/с}$	1784	2881	2133	2180	2593
$\chi_0$	0,03	0,11	0,42	0,55	0,97

**2. Постановка неоднородной задачи.** Рассмотрим теперь пьезокерамический слой класса б мм, который имеет те же геометрические параметры, что и слой, рассмотренный в первой части задачи, но отличается от однородного пьезодиэлектрика непрерывной неоднородностью физико-механических характеристик материала слоя по толщине [5]: а именно: модуль сдвига  $C_{44}$ ; пьезоэлектрический модуль  $e_{15}$ , диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_{11}$  и плотность материала  $\rho$  представим с помощью единой безразмерной функции  $a(y)$ :

$$\begin{aligned} e_{15}(y) &= e_{15}^0 a(y); \quad \varepsilon_{11}(y) = \varepsilon_{11}^0 a(y); \\ \tilde{C}_{44}(y) &= C_{44}^0 a(y); \quad \rho(y) = \rho_0 a(y). \end{aligned} \quad (2.1)$$

Здесь функция  $a(y)$  удовлетворяет условию, когда  $a(0) = 1$ ,  $a'(0) = 0$ ,  $a(y) > 0$  и  $C_{44}^0, \varepsilon_{11}^0, e_{15}^0, \rho_0$  являются постоянными. Поверхность  $y = 0$  с характеристиками  $C_{44}^0, \varepsilon_{11}^0, e_{15}^0, \rho_0$  назовем калибровочной поверхностью.

В дальнейшем условимся называть слой с классической постановкой задачи однородным, а слой с функцией неоднородности  $a(y)$  – соответственно неоднородным.

Если в качестве функции неоднородности взять

$$a(y) = \cosh^2(k\gamma y), \quad (2.2)$$

где  $\gamma$  представляет неотрицательную безразмерную величину, отвечающую за численное наличие неоднородности материала при расчёте фазовой скорости волны, то значение  $\gamma = 0$  нулевой неоднородности будет соответствовать классической постановке задачи, описанной в первой части задачи.

**3. Методика исследования.** Запишем уравнения антиплоского электроупругого состояния с учетом неоднородности по толщине в квазистатическом приближении для данной среды:

$$\nabla^2 W + \frac{a'}{a} \frac{\partial W}{\partial y} = C_t^{-2} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}, \quad (3.1)$$

$$\nabla^2 \varphi + \frac{a' \partial \varphi}{a \partial y} = \frac{e_{15}^0}{\varepsilon_{11}^0} \left[ \nabla^2 W + \frac{a' \partial W}{a \partial y} \right]. \quad (3.2)$$

Здесь необходимо принять во внимание, что при распространении монохроматического электроупругого сигнала типа

$$\tilde{W}(x, y, t) = W_0(y) \exp i(kx - \omega t)$$

в поперечно неоднородном пьезодиэлектрическом слое амплитудная и фазовая функции не связаны между собой нелинейной связью и взаимно не трансформируются [2]. Тогда решения, распространяющиеся вдоль оси  $Ox$  и удовлетворяющие системе уравнений (2.3), (2.4), будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} W(x, y, t) &= W_0(y) \exp i(kx - \omega t), \\ \varphi(x, y, t) &= \varphi_0(y) \exp i(kx - \omega t), \end{aligned} \quad (3.3)$$

где амплитудные функции сдвиговой электроупругой волны запишутся уже с учетом неоднородности материала в виде

$$\begin{aligned} W_0(y) &= (A_1 \sinh(k\alpha y) + A_2 \cosh(k\alpha y)) \cosh^{-1}(k\gamma y), \\ \varphi_0(y) &= \frac{e_{15}^0}{\varepsilon_{11}^0} \cosh^{-1}(k\gamma y) [A_1 \sinh(k\alpha y) + A_2 \cosh(k\alpha y)] + \\ &+ (A_1 \sinh(k\beta y) + A_2 \cosh(k\beta y)) \cosh^{-1}(k\gamma y). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Здесь характеристическое волновое число по толщине слоя изменяется из-за неоднородности материала  $\alpha = (1 - \eta + \gamma^2)^{1/2}$ , где  $\beta = \sqrt{1 + \gamma^2}$ , а обозначения относительной фазовой скорости и скорости объемной бесдисперсионной сдвиговой волны в среде сохраняются:  $\eta = \omega^2 (kC_t)^{-2}$ ,  $C_t^2 = \tilde{C}_{44} \rho_0^{-1}$ .

Очевидно, что простая неоднородность материала слоя (2.1) уже меняет характер амплитудных функций (3.3), и с помощью изменения параметра неоднородности можно будет варьировать глубиной проникновения волновой энергии приграничных локализованных волн по толщине слоя при разных электроупругих граничных условиях.

Из требования существования приповерхностной локализованной волны в обоих случаях условием затухания по глубине слоя волновой интенсивности является  $0 < \alpha < 1$ , которое в общем случае запишется в виде

$$\gamma^2 < \eta < 1 + \gamma^2, \quad 0 \leq \gamma^2 < 1. \quad (3.5)$$

Для сравнительного анализа результатов распространения сдвигового электроупругого монохроматического сигнала в однородном и неоднородном материалах пьезодиэлектрического слоя рассмотрим несколько вариантов электроупругих граничных условий на поверхностях пьезоэлектрического слоя.

Детально изучим возможные поверхностные условия в плане сравнения неоднородных и однородных слоев [6] с целью выявления качественной и

количественной разницы при протекающих в них волновых электроупругих сдвиговых сигналах.

**А. Результаты исследования для граничных условий А.** Если из электрически закрытых поверхностей пьезодиэлектрического слоя одна механически свободна, а другая механически закреплена, то на поверхностях имеем граничные условия

$$\begin{aligned} y = 0, \quad \tilde{\sigma}_{yz} = 0, \quad \tilde{\varphi} = 0, \\ y = 2h, \quad \tilde{w} = 0, \quad \tilde{\varphi} = 0. \end{aligned} \quad (\text{A1.1})$$

Анализируя случаи электромеханически закрытой  $y = 2h$  и механически открытой, но электрически закрытой  $y = 0$  поверхностей пьезодиэлектрического слоя, занимающего область  $-\infty < x < \infty$ ;  $0 \leq y \leq 2h$ ;  $-\infty < z < \infty$ , проведем сравнение характеристик распространения электроупругого сдвигового сигнала в двух одинаковых по размерам и классу симметрии пьезослоях с разными физико-механическими параметрами по толщине слоя: для первого слоя (с классической постановкой) величины электромеханических постоянных на поверхности  $y = 0$  являются неизменными по всей толщине (однородны по толщине); для второго слоя (с неоднородностью) значения параметров на поверхности  $y = 0$  (калибровочная поверхность) меняются по толщине слоя по приведенной функциональной зависимости (2.2).

Учитывая граничные условия и условия существования ненулевых решений краевой задачи  $\det|A_i| = 0$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , в случае однородного пьезодиэлектрического слоя получим следующее трансцендентное дисперсионное уравнение:

$$T_{a_1}(\tilde{\alpha}) = \tilde{\alpha}(1 + \chi_0)\tanh[2kh] - \chi_0\tanh[2kh\tilde{\alpha}]. \quad (\text{A1.2})$$

В предельном случае длинных волн ( $kh \rightarrow 0$ ), когда толщина слоя намного меньше длины волны, единственное решение уравнения (A1.2) будет тривиальным:  $\tilde{\alpha} = 0$ . Из (1.5) будем иметь  $\eta = 1$ , то есть распространяется предельная волна, когда фазовая скорость волны совпадает со скоростью объемной волны ( $\omega k^{-1}$ ) =  $C_t^2$ . В коротковолновом приближении ( $kh \rightarrow \infty$ ), когда толщина слоя намного больше длины волны, решение будет удовлетворять условию (1.6):  $\tilde{\alpha} = \chi_0(1 + \chi_0)^{-1}$ , откуда для относительной фазовой скорости получим

$$\eta = [1 - \chi_0^2(1 + \chi_0)^{-2}] < 1. \quad (\text{A1.3})$$

Данное решение, очевидно, представляет поверхностную волну Блюштейна-Гуляева, локализованную вблизи границы  $y = a$ . Вблизи границы  $y = 2h$  локализованной волны не существует из-за закрепления данной границы.

Для средних значений  $kh$  и разных коэффициентов электромеханической связи (табл. 1) приведем таблицу численных решений (табл. A1.1).

Таблица А1.1

Величины относительной фазовой скорости (однородный случай)

$\eta$	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$
$kh \rightarrow 0$	1	1	1	1	1
$kh = 0,1$	-	-	-	-	-
$kh = 0,5$	-	-	-	-	-
$kh = 1$	-	-	-	-	0,9837
$kh = 2$	-	-	0,9642	0,9142	0,7787
$kh = 5$	-	-	0,9134	0,8745	0,7576
$kh = 10$	-	0,9910	0,9152	0,8740	0,7575
$kh \rightarrow \infty$	0,9991	0,9901	0,9125	0,8740	0,7575

Из рис. А1.1, а также из табл. А1.1 видно, что вблизи свободной поверхности однородного пьезослоя при больших значениях коэффициента электромеханической связи материала уже существует локализованная электроупругая волна.

Исходя из решений характеристического уравнения по рис. А1.1, из соотношения (1.5) получим изображения упругого сдвига и электрического потенциала по толщине пьезоэлектрического слоя для параметров  $kh = 2$ ,  $\chi_3 = 0,42$ .

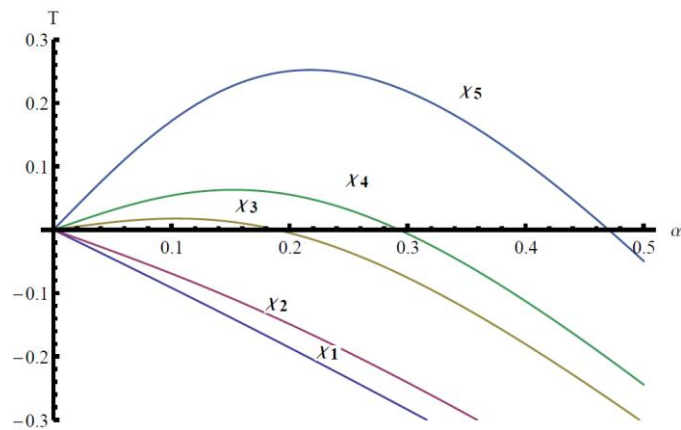


Рис. А1.1. Графики поведения характеристического уравнения в случае однородного пьезоэлектрического слоя

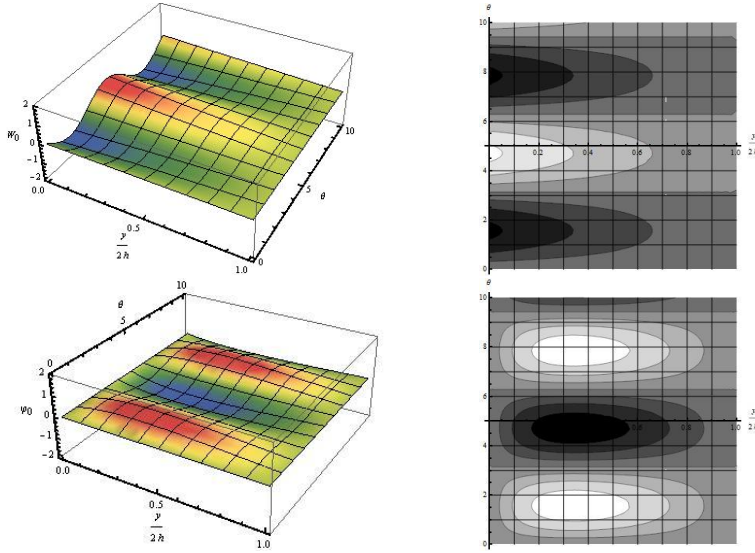


Рис. А1.2. Графики упругого сдвига и электрического потенциала по толщине пьезоэлектрического однородного слоя для параметров  $kh = 2$ ,  $\chi_3 = 0,42$

Из рис. А1.2 видно, что у свободной поверхности однородного пьезослоя при больших значениях коэффициента электромеханической связи материала уже существует локализованная электроупругая волна, а вблизи закрепленной и электрически закрытой поверхности слоя упругий сдвиг и электрический потенциал равны нулю.

С учетом введенной неоднородности (2.2) в случае обсуждаемых граничных условий дисперсионное уравнение принимает вид

$$T_{a_2} = \alpha(1 + \chi_0) \tanh[2kh \sqrt{1 + \gamma^2}] - \chi_0 \sqrt{1 + \gamma^2} \tanh 2kh[2kh\alpha]. \quad (A1.4)$$

Представляя характеристическое уравнение (A1.4) в более удобном виде и учитывая также корень  $\alpha = 0$ ,  $\eta = 1 + \gamma^2$ , получим

$$\frac{\tanh[2kh\alpha]}{\tanh[2kh\sqrt{1 + \gamma^2}]} = \frac{\alpha(1 + \chi_0)}{\chi_0\sqrt{1 + \gamma^2}}. \quad (A1.5)$$

В предельном случае длинных волн ( $kh \rightarrow 0$ ), когда толщина слоя намного меньше длины волны, единственное решение уравнения (A.4) будет тривиальным, описывающим предельные объемные волны:

$$\alpha = 0, \quad \eta = 1 + \gamma^2. \quad (A1.6)$$

В коротковолновом приближении ( $kh \rightarrow \infty$ ), когда толщина слоя намного больше длины волны, решением будет

$$\alpha = \sqrt{1 + \gamma^2} \chi_0 (1 + \chi_0)^{-1}, \quad \eta = (1 + \gamma^2) (1 - \chi_0^2 ((1 + \chi_0)^{-2})) < 1 + \gamma^2. \quad (A1.7)$$

Для средних значений  $kh$  и разных коэффициентов электромеханической связи (табл. 1) приведем таблицу численных решений (табл. A1.2) и график поведения характеристического уравнения (рис. A1.2).

Таблица A1.2  
Величины относительной фазовой скорости  
(неоднородный случай)

$\eta, \gamma = 0,4$	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$
$kh \rightarrow 0$	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
$kh = 0,1$	-	-	-	-	-
$kh = 0,5$	-	-	-	-	-
$kh = 1$	-	-	-	-	1,0916
$kh = 2$	-	-	1,1055	1,0496	0,8965
$kh = 5$	-	1,1579	1,0592	1,0142	0,8787
$kh = 10$	-	1,1493	1,0585	1,0139	0,8787
$kh \rightarrow \infty$	1,159	1,1486	1,0585	1,0139	0,8787

Из рис. A1.3, а также из табл. 1 и A1.2 видно, что вблизи свободной поверхности неоднородного пьезослоя при больших значениях коэффициента электромеханической связи материала также существует локализованная электроупругая волна, причем она усиливается с увеличением значения коэффициента электромеханической связи материала и коэффициента неоднородности  $\gamma$ .

Исходя из решений характеристического уравнения по рис. A1.3, из соотношений (3.4) получим изображения упругого сдвига и электрического потенциала по толщине пьезоэлектрического слоя для параметров  $kh = 2$ ,  $\chi_3 = 0,42$ ,  $\gamma = 0,4$ .

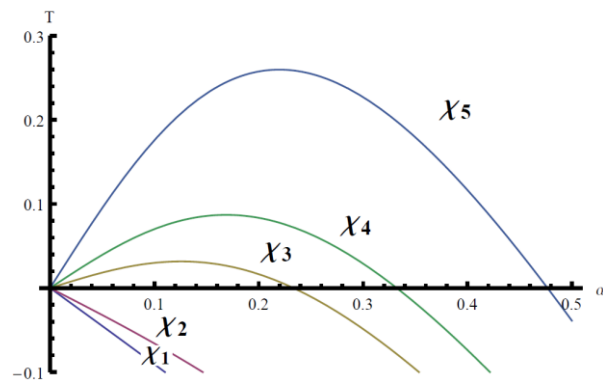


Рис. A1.3. Графики поведения характеристического уравнения в случае неоднородного пьезоэлектрического слоя



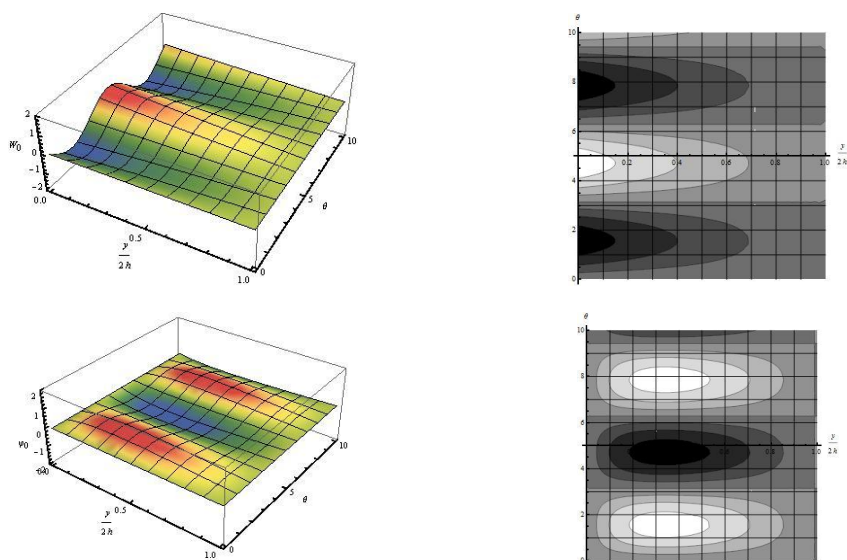


Рис. А1.4. Графики упругого сдвига и электрического потенциала по толщине неоднородного пьезоэлектрического слоя для параметров  $kh = 2, \chi_3 = 0.42, \gamma = 0,4$

Из рис. А1.4 видно, что вблизи свободной поверхности неоднородного пьезослоя при больших значениях коэффициента электромеханической связи материала также существует локализованная электроупругая волна, а вблизи закрепленной и электрически закрытой поверхности слоя упругий сдвиг и электрический потенциал равны нулю. Причем глубина проникновения максимумов упругого сдвига и электрического потенциала по мере удаления от свободной границы в неоднородном пьезоэлектрическом слое больше по сравнению с однородным случаем.

**Выводы для случая А.** Таким образом, исследуя приведенные выше уравнения, можно утверждать, что для значений безразмерного параметра  $kh < 1$  в слоях существуют только объемные предельные сдвиговые волны. Для кристаллов со слабыми и средними величинами пьезоэффекта (в частности, материалы с пьезоэффектом  $\chi_1$  и  $\chi_2$  (табл. 1)) поверхностных волн не наблюдается вплоть до  $kh \gg 1$ .

При данных граничных условиях рассмотренная неоднородность незначительно влияет на локализацию волн (заземленный край дает о себе знать), но меняется скорость возникших волн, что напрямую связано с величиной параметра неоднородности  $\gamma$  (рис. А1.2 и А1.4).

Сравним результаты, полученные при решении дисперсионных уравнений (А1.1) и (А1.4). При значениях параметра  $kh < 1$  в слоях поверхностные волны

не возникают. Но в диапазоне  $kh < 1$  для материалов с пьезоэлектромеханическим коэффициентом выше среднего возникает эффект локализации и распространения волн типа (1.5) и (3.4), удовлетворяющий условиям (1.6) и (3.5) соответственно.

При данных граничных условиях эффект от принятой неоднородности положительно воздействует на локализацию волн слоя с высоким коэффициентом электромеханической связи, а также наблюдается повышение скоростей фазовых волн.

**Б. Результаты исследования для граничных условий Б.** Теперь анализируем случай электромеханически полностью закрытых и электромеханически полностью открытых поверхностей пьезодиэлектрического слоя, занимающего область  $-\infty < x < \infty$ ;  $0 \leq y \leq 2h$ ;  $-\infty < z < \infty$ .

Тогда на поверхностях должны удовлетворяться соответственно условия электромеханических полей:

$$y = 0, \tilde{w} = 0; \tilde{\varphi} = 0,$$

$$y = 2h, \tilde{w} = 0; \tilde{\varphi} = 0$$

или

$$y = 0, \tilde{\sigma}_{yz} = 0; \tilde{D}_y = 0,$$

$$y = 2h, \tilde{\sigma}_{yz} = 0; \tilde{D}_y = 0.$$

При механически закрепленных и электрически закрытых поверхностях пьезослоя характеристическое уравнение, определяющее условия существования и характер распространяющейся волны в однородном пьезодиэлектрическом слое, с учетом условия существования ненулевых решений  $\det|A_i| = 0$ ,  $i = 1, \dots, 4$  получается в виде трансцендентного уравнения

$$T_{\tilde{\sigma}_1}(\tilde{\alpha}) = \sinh[2kh]\sinh[2kh\tilde{\alpha}] = 0. \quad (\text{Б1.1})$$

Из полученного характеристического уравнения становится очевидно, что в этом случае пьезоэффект не играет никакой роли в волновом процессе, а  $T_{\tilde{\sigma}_1}(\tilde{\alpha})$  имеет только тривиальное решение  $\tilde{\alpha} = 0$ ,  $\eta = 1$ . Это соответствует предельной объемной волне, скорость которой совпадает со скоростью объемной волны.

Решения, удовлетворяющие условию затухания по глубине слоя, здесь отсутствуют, что говорит об отсутствии поверхностных электроупругих волн.

В случае, когда учитывается неоднородность (2.2), характеристическое уравнение запишется в виде

$$T_{\tilde{\sigma}_2}(\alpha) = \sinh[2kh\gamma]^2 \sinh[2kh\alpha]\sinh[2kh\beta] = 0, \quad (\text{Б1.2})$$

откуда также получается только тривиальное решение  $1 + \gamma^2 = \eta$ ,  $\alpha = 0$ , соответствующее предельной электроупругой объемной волне.

При механически свободных и электрически открытых поверхностях пьезослоя характеристическое уравнение, определяющее условия существования и характер распространяющейся волны, получается в виде

$$T_{\sigma_3}(\tilde{\alpha}) = \tilde{\alpha}^2(1 + \gamma)^2 \sinh[2kh]^2 \sinh[2kh\tilde{\alpha}] = 0. \quad (\text{Б1.3})$$

В этом случае, как и в случае механически закрепленных и электрически закрытых поверхностей пьезослоя, ясно, что функция  $T_{\sigma_3}(\tilde{\alpha})$  имеет только тривиальное решение  $\tilde{\alpha} = 0$ ,  $\eta = 1$ , пьезоэффект не играет никакой роли в определении характера волны. Здесь также нет решений, удовлетворяющих условию (1.6), что говорит об отсутствии поверхностных волн.

В случае, когда учитывается неоднородность (2.2), характеристическое уравнение преобразуется к виду

$$T_{\sigma_4}(\alpha) = (\alpha \tanh[2kh\alpha] - \gamma \tanh[2kh\gamma]) \times \\ \times \left( \gamma \tanh[2kh\gamma] - \sqrt{1 + \gamma^2} \tanh \left[ 2kh\sqrt{1 + \gamma^2} \right] \right) = 0. \quad (\text{Б1.4})$$

В коротковолновом приближении ( $kh \rightarrow \infty$ ), когда толщина слоя намного больше длины волны, решением будет:  $\alpha = \gamma$ ,  $\eta = 1$ .

Отсюда также очевидно, что существует тривиальное решение, соответствующее предельной объемной волне, причем скорость волны совпадает со скоростью объемной волны, или  $\eta = 1 + \left(\frac{\pi n}{2kh}\right)^2$ .

**Выводы для случая Б.** Спецификой данных граничных условий является полное отсеивание волновой энергии по всей толщине волновода. И пьезоэлектрический эффект, и неоднородность материала не играют никакой роли в возможности локализации волн вблизи одной из поверхностей слоя.

В однородном и неоднородном слоях выявлена только группа объемных волн, и разность между их скоростями обуславливается параметром  $\gamma$  неоднородности (2.2).

**В. Результаты исследования для граничных условий В.** Проанализируем случай механически открытой, но электрически закрытой и электромеханически полностью открытой поверхностей пьезодиэлектрического слоя, занимающего область  $-\infty < x < \infty$ ;  $0 \leq y \leq 2h$ ;  $-\infty < z < \infty$ .

Тогда на поверхностях должны удовлетворяться соответственно условия электромеханических полей:

$$y = 0, \tilde{\sigma}_{yz} = 0; \tilde{\varphi} = 0, \quad y = 2h, \tilde{\sigma}_{yz} = 0; \tilde{D}_y = 0.$$

При этих условиях на поверхностях пьезослоя характеристическое уравнение, определяющее условия существования и характер распространяющейся волны в однородном пьезодиэлектрике, из условия существования ненулевых решений  $\det|A_i| = 1$ ,  $i = 1, \dots, 4$  получается в виде трансцендентного уравнения

$$T_{e_1}(\tilde{\alpha}) = -\tilde{\alpha}(1 + \chi)(-\chi \tanh[2kh] + \tilde{\alpha}(1 + \chi) \tanh[2kh\tilde{\alpha}]) = 0. \quad (B1.1)$$

В предельном случае длинных волн ( $kh \rightarrow 0$ ), когда толщина слоя намного меньше длины волны, получаем еще одну предельную волну с характеристиками

$$\tilde{\alpha}^2 = \chi_0(1 + \chi_0)^{-1}, \quad \eta = (1 + \chi_0)^{-1} < 1. \quad (B1.2)$$

В коротковолновом приближении ( $kh \rightarrow \infty$ ), когда толщина слоя намного больше длины волны, решения, удовлетворяющие условию (1.6), характеризуются параметрами

$$\tilde{\alpha} = \chi_0(1 + \chi_0)^{-1}, \quad \eta = [1 - \chi_0^2(1 + \chi_0)^{-2}] < 1. \quad (B1.3)$$

Данное решение можно представить как поверхностную волну Блюштейна-Гуляева, локализованную вблизи поверхности  $y = 0$ , так как при  $kh \rightarrow \infty$  пьезослой можно считать как совокупность двух электроупругих полупространств.

Для практически всех значений относительной длины волны и разных коэффициентов электромеханической связи материала (табл. 1) приведем таблицу численных решений (табл. B1.1), соответствующих относительной фазовой скорости локализованной электроупругой волны, и графики поведения характеристического уравнения (рис. B1.1a и B1.1б).

Таблица B1.1

$\eta$	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$
$kh \rightarrow 0$	0,9708	0,9009	0,7042	0,6451	0,5076
$kh = 0,1$	0,9712	0,9020	0,7069	0,6481	0,5109
$kh = 0,5$	0,9776	0,9225	0,7567	0,7035	0,5730
$kh = 1$	0,9856	0,9490	0,8257	0,7818	0,6650
$kh = 2$	0,9924	0,9716	0,8857	0,8495	0,7408
$kh = 5$	0,9967	0,9857	0,9115	0,8736	0,7575
$kh = 10$	0,9982	0,9895	0,9125	0,8740	0,7575
$kh \rightarrow \infty$	0,9991	0,9901	0,9125	0,8740	0,7575

Таблица B1.2

$\eta, \gamma = 0,4$	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$
$kh \rightarrow 0$	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
$kh = 0,1$	0,9712	0,9020	0,7069	0,6481	0,5109
$kh = 0,5$	0,9780	0,9238	0,7599	0,7071	0,5772
$kh = 1$	0,9876	0,9557	0,8450	0,8044	0,6932
$kh = 2$	0,9965	0,9868	0,9390	0,9145	0,8250
$kh = 5$	0,9999	0,9998	0,9984-1,0649	0,9942-1,0229	0,8785-1,0017
$kh = 10$	1	1- 1,1499	1-1,0585	0,9999-1,0139	0,8787-1
$kh \rightarrow \infty$	1,1590	1,1486	1,0585	1,0139	0,8787

Из табл. В1.1 видно, что практически всегда существует предельная волна, произрастающая в локализованную вблизи механически открытой и электрически закрытой поверхностей пьезослоя  $y = 0$ .

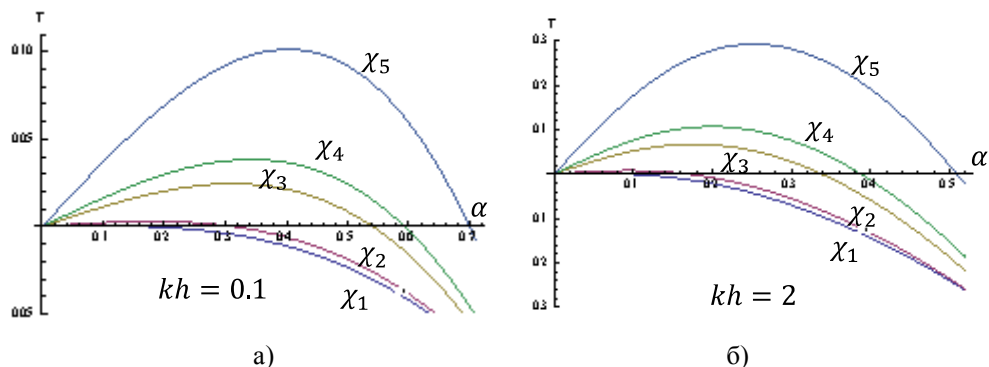


Рис. В1.1. Графики характеристического уравнения в зависимости от относительной длины электроупругой волны в случае однородного пьезоэлектрического слоя при  $\chi_3 = 0,4$  для параметров: а –  $kh = 0,1$ , б –  $kh = 2$

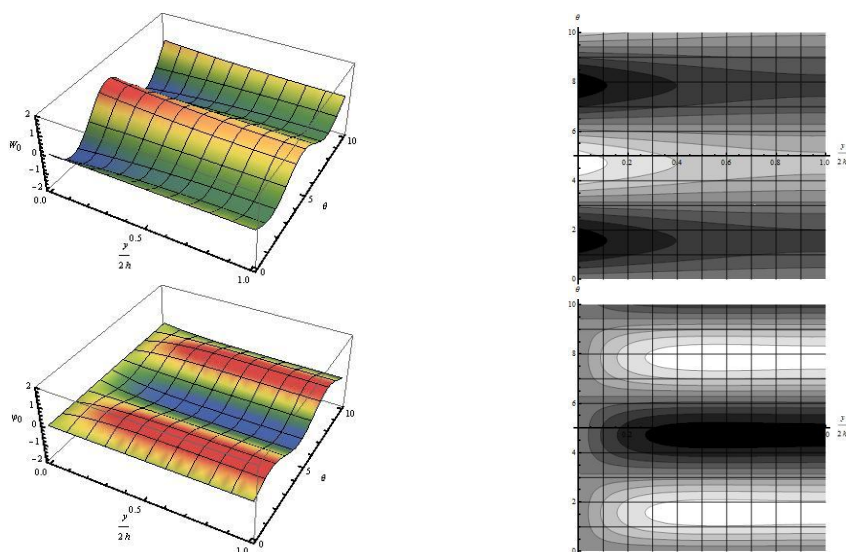


Рис. В1.2. Графики упругого сдвига и электрического потенциала по толщине однородного пьезоэлектрического слоя для параметров  $kh = 2$ ,  $\chi_3 = 0,42$

Анализируя случай механически открытой, но электрически закрытой и электромеханически полностью открытой поверхностей неоднородного

пъезодиэлектрического слоя, занимающего область  $-\infty < x < \infty$ ;  $0 \leq y \leq 2h$ ;  $-\infty < z < \infty$ , из условия существования ненулевых решений  $\det|A_t| = 0$ ,  $i = 1, \dots, 4$  получается следующее трансцендентное уравнение:

$$\begin{aligned}
 T_{62} = & \alpha\sqrt{1+\gamma^2}(1+\chi) \times \\
 & \times \left( \chi\sqrt{1+\gamma^2} \tanh[2kh\sqrt{1+\gamma^2}] - \alpha(1+\chi) \tanh[2kh\alpha] \right) + \\
 & + \gamma^2(1+\chi)(\tanh[2khy])^2 \times \\
 & \times \left( \chi\sqrt{1+\gamma^2} \tanh[2kh\alpha] - \alpha(1+\chi) \tanh[2kh\sqrt{1+\gamma^2}] \right) + \\
 & + \gamma^2(1+\chi) \tanh[2khy] \cdot \left( \alpha\sqrt{1+\gamma^2} + \right. \\
 & \left. + (\alpha^2(1+\chi) - \chi(1+\gamma^2)) \tanh[2kh\alpha] \tanh[2kh\sqrt{1+\gamma^2}] \right) = 0.
 \end{aligned} \tag{B1.4}$$

В предельном случае длинных волн ( $kh \rightarrow 0$ ), когда толщина слоя намного меньше длины волны, единственное решение этого уравнения будет тривиальным и будет соответствовать предельной объемной волне:

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \sqrt{\frac{\chi(1+\gamma^2)}{1+\chi} + \gamma^2}; \quad \eta_1 = 1 + \gamma^2, \eta_2 = 1 - \frac{\chi(1+\gamma^2)}{1+\chi}. \tag{B1.5}$$

В коротковолновом приближении ( $kh \rightarrow \infty$ ), когда толщина слоя намного больше длины волны, получим корни:

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 = \gamma, \quad \alpha_2 = \sqrt{1+\gamma^2}\chi_0(1+\chi_0)^{-1}; \\
 \eta_1 = 1, \quad \eta_2 = (1+\gamma^2)(1-\chi_0^2(1+\chi_0)^{-2}) < 1 + \gamma^2.
 \end{aligned} \tag{B1.6}$$

Для средних значений  $kh$  и значения неоднородности  $\gamma = 0,4$  при разных коэффициентах электромеханической связи (табл. 1) приведем таблицу численных решений для неоднородного слоя и графики поведения характеристического уравнения.

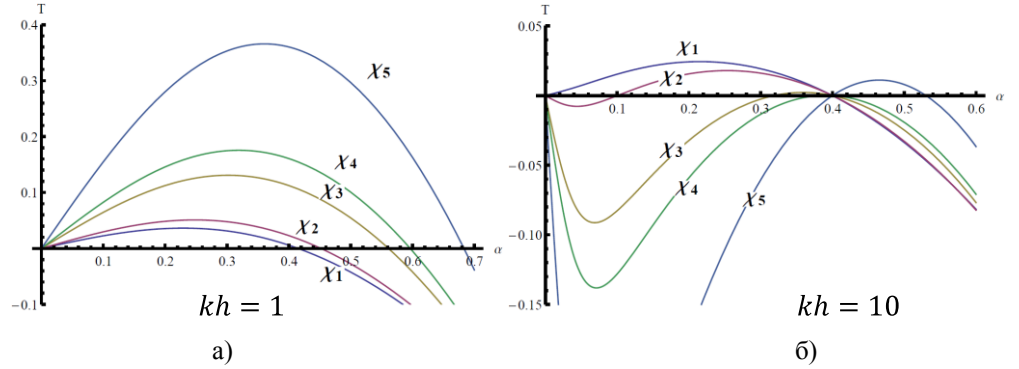


Рис. В1.3. Графики характеристического уравнения в зависимости от относительной длины электроупругой волны в случае неоднородного пьезоэлектрического слоя при  $\gamma = 0,4$  для параметров: а –  $kh = 1$ , б –  $kh = 10$

**Выводы для случая В.** Из рис. В1.3 видно, что еще при средних значениях длины волны  $kh = 1$  характер характеристического уравнения не меняется, и волновое распределение по толщине слоя еще будет похоже на распределение, как в случае однородного слоя. При распространении коротковолновых сигналов  $kh = 10$  неоднородность материала приводит к возникновению второго корня характеристического уравнения, то есть упругий сдвиг начинает локализоваться у обеих поверхностей пьезослоя, а локализация электрического потенциала перемещается к электрически открытой поверхности (рис. В1.4).

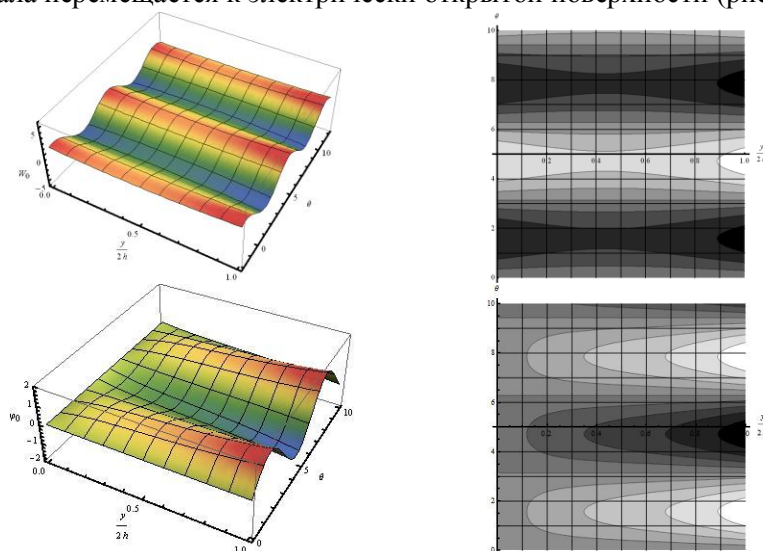


Рис. В1.4. Графики упругого сдвига и электрического потенциала по толщине неоднородного пьезоэлектрического слоя для параметров  $kh = 2, \chi_3 = 0,42, \gamma = 0,4$

Из рис. В1.2 и В1.4 становится очевидно, что введенная неоднородность приводит к увеличению амплитуд локализации как упругого сдвига, так и электрического потенциала вблизи поверхностей слоя.

При более коротких волнах  $kh = 10$  неоднородность резко усиливает локализацию вблизи поверхностей слоя, увеличивая значения амплитуд в сотни раз (рис. В1.5).

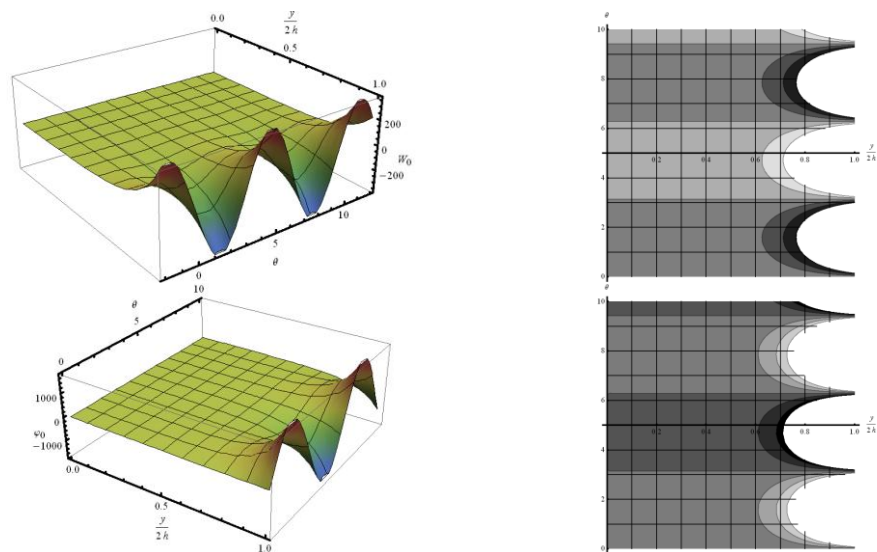


Рис. В1.5. Графики упругого сдвига и электрического потенциала по толщине неоднородного пьезоэлектрического слоя для параметров  $kh = 10$ ,  $\chi_3 = 0,42$ ,  $\gamma = 0,4$

Данные граничные условия дают ярко выраженный эффект волновой локализации для однородного слоя, которая возникает уже с малых значений параметра  $kh$ .

В неоднородном слое функция неоднородности (2.2) усиливает эффект локализации, и возникают вторые решения, удовлетворяющие условию затухания (3.5). То есть, в неоднородном слое волны локализуются также вблизи поверхности  $y = 2h$ .

**Заключение.** Рассматривая задачу на выявление качественных и количественных эффектов в случае распространения монохроматического электроупругого сигнала в неоднородных по толщине пьезодиэлектрических слоях, получено, что при различных сочетаниях граничных условий на поверхностях слоя (в отличие от случая распространения такого же сигнала в однородном слое) в приграничных областях слоев возможны генерация и локализация волн.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аветисян А.С.** Поверхностные электроупругие волны Лява в случае неоднородного пьезоэлектрического слоя // Изв. АН АрмССР. Механика. – 1987. – Т. 40, № 1. – С. 24-29.
2. **Аветисян А.С.** О распространении электроупругой монохроматической волны в неоднородном пьезоэлектрике // Изв. АН АрмССР. Механика. – 1988. – Т. 41, № 5. – С. 34-40.



3. **Li Peng, Feng Jin.** Bleustein-Gulyaev waves in a transversely isotropic piezoelectric layered structure with an imperfectly bonded interface // Smart Mater. Struct. – 2012. –21 (045009).
4. **Cao Xiaoshan, Jin Feng, Wang ZiKun & Lu Tian Jian.** Bleustein-Gulyaev waves in a functionally graded piezoelectric material layered structure // Sci China Ser G-PhysMechAstron. – Apr. 2009. – Vol. 52, no. 4. – P. 613-625.
5. **Камалян А.А.** О распространении и поведении электроупругой волны в пьезоэлектрике в зависимости от неоднородности // Изв. НАН Армении. Механика. – 2013. – Т. 66, № 4. – С. 38-48.
6. **Belubekyan M.V., Belubekyan V.M.** Surface waves in piezoactive elastic system of a layer on a semi-space // Proceedings of the Yerevan State University, Physical and Mathematical Sciences. Mechanics. – 2013. – № 3. – P. 45-48.

*Поступила в редакцию 18.04.2014.  
Принята к опубликованию 19.05.2014.*

**ՊԻԵԶՈՂԻԷԼԵԿՏՐԻԿԱԿԱՆ ՇԵՐՏԻ ԱՆՀԱՄԱՍԵՌՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԵԶՐԱՅԻՆ  
ՊԱՅՄԱՆՆԵՐԻ ՀԱՄԱԿՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՍԱՀՔԻ  
ԷԼԵԿՏՐԱՌԱՉԳԱԿԱՆ ԱԼԻՔԻ ՏԱՐԱԾՄԱՆ ՎՐԱ**

**Ա.Ս. Ավետիսյան, Ա.Ա. Քամալյան**

Դիտարկվում է պիեզոկերամիկական, դիէլեկտրիկական և ըստ հաստության անհամասեռ շերտերում, դրանց մակերևույթներին տարբեր եզրային պայմանների ընտրությամբ, մոնոքրոմատիկ էլեկտրաառաձգական ալիքի տարածման որակական երևույթների բացահայտման խնդիրը՝ ի տարբերություն համասեռ շերտում նմանատիպ ալիքների տարածման դեպքի:

**Առանցքային բաներ.** սահքի էլեկտրաառաձգական ալիքային ազդանշան, անհամասեռ պիեզոդիէլեկտրիկական շերտ, ալիքի բաշխման բնույթ՝ ըստ շերտի հաստության:

**THE INFLUENCE OF CROSS INHOMOGENEITY OF PIEZOELECTRIC LAYER  
AND COMBINATIONS OF BOUNDARY CONDITIONS ON THE SHEAR  
ELECTROELASTIC SIGNAL PROPAGATION**

**A.S. Avetisyan, A.A. Kamalyan**

The exposure of quality effects in case of propagation of monochromatic, electroelastic signal in piezoceramic, dielectric and inhomogeneously thick layers at different boundary conditions on the layer surfaces in contrast to the case of propagation of a similar signal in a homogeneous layer is considered.

**Keywords:** electroelastic shear wave signal, inhomogeneous piezoelectric layer, nature of the wave propagation over the layer thickness.

## ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ СОСТАВНОЙ ПЛОСКОСТИ С ТРЕЩИНАМИ

Л.А. Арутюнян<sup>1</sup>, М.К. Сагателян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики НАН Республики Армения

<sup>2</sup> Государственный инженерный университет Армении (Политехник)

Рассматриваются плоские задачи теории упругости для составной плоскости, состоящей из двух полуплоскостей с различными упругими характеристиками и имеющимися между ними конечными или полубесконечными трещинами. При помощи интегралов Фурье в биполярной системе координат через функции Папковича-Нейбера задачи решаются замкнуто. Рассмотрены конкретные примеры.

**Ключевые слова:** составное тело, трещины, биполярные координаты, функции Папковича-Нейбера, преобразования Фурье.

**Введение.** Рассматриваются плоские задачи составной плоскости, состоящей из двух полуплоскостей с различными упругими характеристиками и имеющимися между ними конечными трещинами или полубесконечными трещинами. Задачи о трещинах связаны с задачами определения напряженно-деформированного состояния в однородных и неоднородных упругих телах, представляющими интерес в теоретических и практических вопросах прочности разнообразных конструкций, которые стали предметом исследования многих авторов [1-6].

**Постановка задачи.** На прямоугольной системе координат  $(x, y)$  при  $y > 0$  полуплоскость имеет упругие характеристики  $G_1$  и  $\nu_1$ , а при  $y < 0$  – упругие характеристики  $G_2$  и  $\nu_2$  ( $G_1$  и  $G_2$  – модули сдвига материалов,  $\nu_1$  и  $\nu_2$  – коэффициенты Пуассона).

Для решения задачи весьма удобно использовать биполярные системы координат. Связь прямоугольных координат  $x$  и  $y$  с биполярными координатами  $\alpha$  и  $\beta$  задается формулами [7]

$$gx = sh\alpha, \quad gy = \sin\beta, \quad ag = ch\alpha + \cos\beta, \quad (1)$$

где  $a$  – размерный параметр.

Координата  $\alpha$  будет при этом изменяться от  $-\infty$  до  $+\infty$ , в правой полуплоскости –  $\alpha > 0$ , в левой полуплоскости –  $\alpha < 0$ ; ось  $OY$  является координатной линией  $\alpha = 0$ ; точки  $x = \pm a, y = 0$  соответствуют значениям  $\alpha = \pm \infty$ . Координата  $\beta$  меняется от  $-\pi$  до  $+\pi$ , в верхней полуплоскости –  $\beta > 0$ , в

нижней полуплоскости  $-\beta < 0$ ; отрезок  $[-a, a]$  является координатной линией  $\beta = 0$ . Что касается отрезков оси  $OX$  при  $x < -a$  и  $x > a$ , то здесь координата  $\beta$  терпит разрыв, равный  $2\pi$ , а именно, на верхнем берегу ( $y=+0$ )  $-\beta = \pi$ , на нижнем берегу ( $y=-0$ )  $-\beta = -\pi$ .

**Методы исследования.** Задачи решаются при помощи функций Папковича-Нейбера. Общее решение плоской задачи теории упругости, согласно Папковичу-Нейберу, можно представить через три гармонические функции, причем одна из них принимается произвольно. Пользуясь этой произвольностью, принимаем одну из функций равной тождественно нулю.

Приведем выражения перемещений  $U$  и  $V$ , напряжений  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$  через функции Папковича-Нейбера [7]:

$$\begin{aligned} 2GU(x, y) &= -\frac{\partial \Phi_0(x, y)}{\partial x} - y \frac{\partial \Phi_2(x, y)}{\partial x}, \\ 2GV(x, y) &= (3-4\nu)\Phi_2(x, y) - \frac{\partial \Phi_0(x, y)}{\partial y} - y \frac{\partial \Phi_2(x, y)}{\partial y}, \\ \sigma_y(x, y) &= \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2(1-\nu)\phi_2(x, y) - \frac{\partial \Phi_0(x, y)}{\partial y} \right] - y \frac{\partial^2 \Phi_2(x, y)}{\partial y^2}, \\ \tau_{xy}(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ (1-2\nu)\Phi_2(x, y) - \frac{\partial \Phi_0(x, y)}{\partial y} - y \frac{\partial \Phi_2(x, y)}{\partial y} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

1. Пусть на участках граничной прямой  $y = 0$ , а именно – на отрезке  $|x| < a$ , имеем трещину, а на участках  $|x| > a$  – полный контакт материалов (рис. 1).

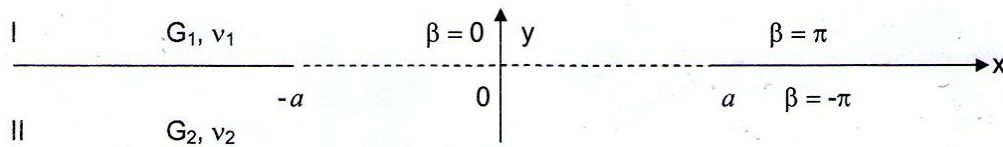


Рис. 1

Рассмотрим смешанную краевую задачу, т.е. на верхнем берегу трещины заданы нормальные перемещения и касательные напряжения, а на нижнем берегу – касательные перемещения и нормальные напряжения:

$$\begin{aligned} \tau_{xy}^{(1)} \Big|_{\beta=0} &= \tau_1(\alpha), & V_1 \Big|_{\beta=0} &= V_0(\alpha), \\ \sigma_y^{(2)} \Big|_{\beta=0} &= \sigma_2(\alpha), & U_2 \Big|_{\beta=0} &= U_0(\alpha). \end{aligned} \quad (3)$$

Предполагается, что функции  $\tau_1(\alpha)$ ,  $\sigma_2(\alpha)$ ,  $V_0(\alpha)$  и  $U_0(\alpha)$  удовлетворяют условиям разложимости в интеграле Фурье.

На линии контакта имеем полное сцепление материалов, т.е. нормальное и касательное перемещения, а также нормальное и касательное напряжения равны

$$\begin{aligned} U_1 \Big|_{\beta=\pi} &= U_2 \Big|_{\beta=-\pi}, & V_1 \Big|_{\beta=\pi} &= V_2 \Big|_{\beta=-\pi}, \\ \sigma_y^{(1)} \Big|_{\beta=\pi} &= \sigma_y^{(2)} \Big|_{\beta=-\pi}, & \tau_{xy}^{(1)} \Big|_{\beta=\pi} &= \tau_{xy}^{(2)} \Big|_{\beta=-\pi}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя в граничные условия (3) и (4) выражения (2) перемещений и напряжений через гармонические функции  $\Phi_0^{(m)}(\alpha, \beta)$  и  $\Phi_2^{(m)}(\alpha, \beta)$  ( $m=1,2$ ) Папковича-Нейбера, приходим к следующей краевой задаче. При этом следует перейти от производных  $x$  и  $y$  к производным по  $\alpha$  и  $\beta$  [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left[ (1-2\nu_1)\Phi_2^{(1)}(\alpha, \beta) - \Phi_3^{(1)}(\alpha, \beta) \right] \Big|_{\beta=0} &= \frac{\alpha \tau_1(\alpha)}{ch\alpha + 1}, \\ (3-4\nu_1)\Phi_2^{(1)}(\alpha, 0) - \Phi_3^{(1)}(\alpha, 0) &= 2G_1 V_0(\alpha), \\ \frac{\partial}{\partial \beta} \left[ 2(1-\nu_2)\Phi_2^{(2)}(\alpha, \beta) - \Phi_3^{(2)}(\alpha, \beta) \right] \Big|_{\beta=0} &= \frac{a\sigma_2(\alpha)}{ch\alpha + 1}, \\ \frac{\partial \Phi_3^{(2)}(\alpha, \beta)}{\partial \beta} \Big|_{\beta=0} &= 2G_2 \frac{\partial U_0(\alpha)}{\partial \alpha}, \\ \frac{1}{G_1} \frac{\partial \Phi_3^{(1)}(\alpha, \beta)}{\partial \beta} \Big|_{\beta=\pi} &= \frac{1}{G_2} \frac{\partial \Phi_3^{(2)}(\alpha, \beta)}{\partial \beta} \Big|_{\beta=-\pi}, \\ \frac{1}{G_1} [(3-4\nu_1)\Phi_2^{(1)}(\alpha, \beta) - \Phi_3^{(1)}(\alpha, \beta)] \Big|_{\beta=\pi} &= \frac{1}{G_2} [(3-4\nu_2)\Phi_2^{(2)}(\alpha, \beta) - \Phi_3^{(2)}(\alpha, \beta)] \Big|_{\beta=-\pi}, \\ \frac{\partial}{\partial \beta} [2(1-\nu_1)\Phi_2^{(1)}(\alpha, \beta) - \Phi_3^{(1)}(\alpha, \beta)] \Big|_{\beta=\pi} &= \frac{\partial}{\partial \beta} [2(1-\nu_2)\Phi_2^{(2)}(\alpha, \beta) - \Phi_3^{(2)}(\alpha, \beta)] \Big|_{\beta=-\pi}, \\ \frac{\partial}{\partial \alpha} [(1-2\nu_1)\Phi_2^{(1)}(\alpha, \beta) - \Phi_3^{(1)}(\alpha, \beta)] \Big|_{\beta=\pi} &= \frac{\partial}{\partial \alpha} [(1-2\nu_2)\Phi_2^{(2)}(\alpha, \beta) - \Phi_3^{(2)}(\alpha, \beta)] \Big|_{\beta=-\pi}, \end{aligned} \quad (5)$$

где введены новые гармонические функции

$$\Phi_3^{(m)}(x, y) = \frac{\partial \Phi_0^{(m)}(x, y)}{\partial y} \quad (m=1,2). \quad (6)$$

Рассматриваемая краевая задача допускает точное решение в биполярных координатах, если представить искомые функции  $\phi_n^{(m)}(\alpha, \beta)$  ( $m=1,2; n=2,3$ ) в виде интегралов Фурье:

$$\phi_n^{(m)}(\alpha, \beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [A_n^{(m)}(\lambda) ch\lambda\beta + B_n^{(m)}(\lambda) sh\lambda\beta] \frac{e^{-i\lambda\alpha}}{\lambda} d\lambda. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), приходим к системе линейных алгебраических уравнений для определения величин  $A_n^{(m)}(\lambda)$  и  $B_n^{(m)}(\lambda)$  ( $m=1,2$ ;  $n=2,3$ ), правые части которых будут содержать преобразования Фурье от заданных функций.

После решения этих систем получаем следующие значения для неизвестных величин интегрирования:

$$\begin{aligned}
A_2^{(1)}(\lambda) &= \frac{2}{\chi_1 + 1} [\bar{V}_0(\lambda) - \bar{\tau}_1(\lambda)], \\
A_3^{(1)}(\lambda) &= \frac{1}{\chi_1 + 1} [(\chi_1 - 1)\bar{V}_0(\lambda) - 2\chi_1\bar{\tau}_1(\lambda)], \\
B_2^{(2)}(\lambda) &= \frac{2}{\chi_2 + 1} [\bar{U}_0(\lambda) + \bar{\sigma}_2(\lambda)], \\
B_3^{(2)}(\lambda) &= \bar{U}_0(\lambda), \\
B_3^{(1)}(\lambda) &= \frac{K_1(\lambda)}{ch\lambda\pi} - \mu A_3^{(2)}(\lambda) th\lambda\pi, \\
B_2^{(1)}(\lambda) &= \frac{1}{\chi_1 sh\lambda\pi} [K_2(\lambda) + K_1(\lambda) th\lambda\pi + \mu\chi_2 A_2^{(2)}(\lambda) ch\lambda\pi - \mu A_3^{(2)}(\lambda) \frac{ch2\lambda\pi}{ch\lambda\pi}], \\
A_2^{(2)}(\lambda) &= \frac{\Delta_1(\lambda)}{\Delta(\lambda)}, \\
A_3^{(2)}(\lambda) &= \frac{\Delta_2(\lambda)}{\Delta(\lambda)},
\end{aligned} \tag{8}$$

где

$$\begin{aligned}
\Delta(\lambda) &= a_{11}(\lambda)a_{22}(\lambda) - a_{12}(\lambda)a_{21}(\lambda), \\
\Delta_1(\lambda) &= a_{22}(\lambda)b_1(\lambda) - a_{12}(\lambda)b_2(\lambda), \\
\Delta_2(\lambda) &= a_{11}(\lambda)b_2(\lambda) - a_{21}(\lambda)b_1(\lambda); \\
a_{11}(\lambda) &= \chi_1(\chi_2 + 1)sh^2\lambda\pi + \mu\chi_2(\chi_1 + 1)ch^2\lambda\pi, \\
a_{12}(\lambda) &= (\mu\chi_1 - 2\chi_1 - \mu)sh^2\lambda\pi - \mu(\chi_1 + 1)ch^2\lambda\pi, \\
a_{21}(\lambda) &= [\mu\chi_2(\chi_1 - 1) - \chi_1(\chi_2 - 1)]ch^2\lambda\pi, \\
a_{22}(\lambda) &= (2\chi_1 - \mu\chi_1 + \mu)ch^2\lambda\pi + \mu(\chi_1 + 1)sh^2\lambda\pi; \\
b_1(\lambda) &= (\chi_1 - 1)K_1(\lambda)sh\lambda\pi - (\chi_1 + 1)K_2(\lambda)ch\lambda\pi + 2\chi_1K_3(\lambda)sh\lambda\pi, \\
b_2(\lambda) &= (\chi_1 + 1)K_1(\lambda)sh\lambda\pi - (\chi_1 - 1)K_2(\lambda)ch\lambda\pi + 2\chi_1K_4(\lambda)ch\lambda\pi; \\
K_1(\lambda) &= \mu\bar{U}_0(\lambda)ch\lambda\pi - \frac{sh\lambda\pi}{\chi_1 + 1} [(\chi_1 - 1)\bar{V}_0(\lambda) - 2\chi_1\bar{\tau}_1(\lambda)],
\end{aligned} \tag{9}$$

$$K_2(\lambda) = -\bar{V}_0(\lambda)ch\lambda\pi - \frac{\mu sh\lambda\pi}{\chi_2 + 1} [(\chi_2 - 1)\bar{U}_0(\lambda) + 2\chi_2\bar{\sigma}_2(\lambda)],$$

$$K_3(\lambda) = \bar{\sigma}_2(\lambda)ch\lambda\pi - \frac{sh\lambda\pi}{\chi_1 + 1} [2\bar{V}_0(\lambda) + (\chi_1 - 1)\bar{\tau}_1(\lambda)],$$

$$K_4(\lambda) = -\bar{\tau}_1(\lambda)ch\lambda\pi + \frac{sh\lambda\pi}{\chi_2 + 1} [2\bar{U}_0(\lambda) - (\chi_2 - 1)\bar{\sigma}_2(\lambda)],$$

$$\bar{\tau}_1(\lambda) = \frac{ia}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tau_1(\alpha)e^{i\lambda\alpha}}{ch\alpha + 1} d\alpha,$$

$$\bar{V}_0(\lambda) = \frac{2G_1\lambda}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} V_0(\alpha)e^{i\lambda\alpha} d\alpha,$$

$$\bar{\sigma}_2(\lambda) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma_2(\alpha)e^{i\lambda\alpha}}{ch\alpha + 1} d\alpha,$$

$$\bar{U}_0(\lambda) = \frac{2G_2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial U_0(\alpha)}{\partial \alpha} e^{i\lambda\alpha} d\alpha,$$

$$\mu = \frac{G_1}{G_2}; \quad \chi_m = 3 - 4\nu_m \quad (m=1,2).$$

2. Пусть на участках граничной прямой  $y=0$ , а именно – на отрезках  $|x| > a$ , имеем трещину, а на участках  $|x| < a$  – полный контакт материалов (рис. 2).

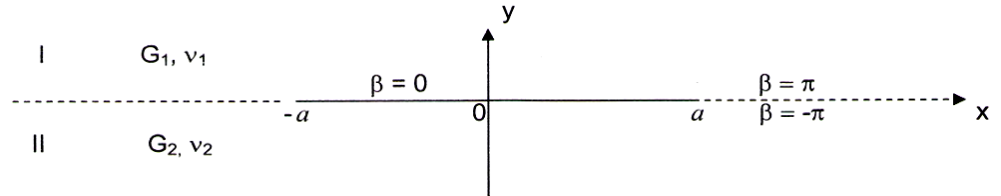


Рис. 2

Граничные и контактные условия в этом случае имеют вид

$$\begin{aligned} \tau_{xy} \Big|_{\beta=\pi} &= \tau_1(\alpha); & V_1 \Big|_{\beta=\pi} &= V_0(\alpha), \\ \sigma_y^{(2)} \Big|_{\beta=-\pi} &= \sigma_2(\alpha); & U_2 \Big|_{\beta=-\pi} &= U_0(\alpha), \\ U_1 \Big|_{\beta=0} &= U_2 \Big|_{\beta=0}; & V_1 \Big|_{\beta=0} &= V_2 \Big|_{\beta=0}, \\ \sigma_y^{(1)} \Big|_{\beta=0} &= \sigma_y^{(2)} \Big|_{\beta=0}; & \tau_{xy}^{(1)} \Big|_{\beta=0} &= \tau_{xy}^{(2)} \Big|_{\beta=0}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда функции  $\Phi_n^{(m)}(\alpha, \beta)$  ( $m=1,2; n=2,3$ ) ищем в следующем виде интегралов Фурье:

$$\Phi_n^{(m)}(\alpha, \beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} [A_n^{(m)}(\lambda) \operatorname{ch} \lambda (\pi + (-1)^m \beta) + (-1)^{m+1} B_n^{(m)}(\lambda) \operatorname{sh} (\pi + (-1)^m \beta)] \frac{e^{-i\lambda\alpha}}{\lambda} d\lambda. \quad (11)$$

После удовлетворения краевым и контактными условиями (10), учитывая формулы (1), (2), (11) для неизвестных величин  $A_n^{(m)}(\lambda)$  и  $B_n^{(m)}(\lambda)$  ( $m=1,2; n=2,3$ ), получаем опять значения (8) и (9), только в этом случае  $\bar{\tau}_1(\lambda)$  и  $\bar{U}_0(\lambda)$  равны

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_1(\lambda) &= -\frac{ia}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tau_1(\alpha) e^{i\lambda\alpha}}{\operatorname{ch} \alpha - 1} d\alpha, \\ \bar{U}_0(\lambda) &= -\frac{2G_2}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial U_0(\alpha) e^{i\lambda\alpha}}{\partial \alpha} d\alpha. \end{aligned} \quad (12)$$

Дадим решение одной конкретной задачи, когда внешние усилия, приложенные к берегам трещины, сводятся к сосредоточенным силам величины  $P$ , приложенным в точке  $y=0, x=b$  в первом случае  $-a < b < a$  (рис. 3) и  $b < -a$  или  $b > a$  – во втором случае (рис. 4).

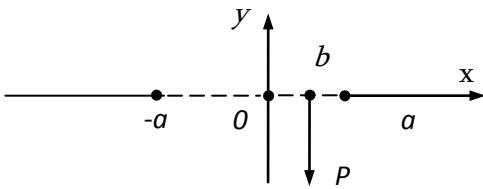


Рис. 3

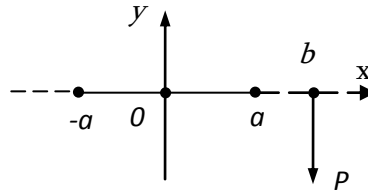


Рис. 4

Представляет интерес распределение напряжений на линии контакта:

- в первом случае:

$$\begin{aligned} \sigma_y^{(1)}(\alpha, \pi) = \sigma_y^{(2)}(\alpha, -\pi) &= \frac{K_1 \cdot P \cos(\alpha - \alpha_0) \theta}{\pi \sqrt{2(K_0 + 1)}} \cdot \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{(x-b)\sqrt{x^2 - a^2}}, \\ \tau_{xy}^{(1)}(\alpha, \pi) = \tau_{xy}^{(2)}(\alpha, -\pi) &= -\frac{K_2 \cdot P \sin(\alpha - \alpha_0) \theta}{\pi \sqrt{2(K_0 - 1)}} \cdot \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{(x-b)\sqrt{x^2 - a^2}}, \end{aligned} \quad (13)$$

- во втором случае:

$$\begin{aligned}\sigma_y^{(m)}(\alpha, 0) &= \frac{K_5 \cdot P \cos(\alpha_0 - \alpha)\theta}{\pi \sqrt{2(K_0 + 1)}} \cdot \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{(b-x)\sqrt{a^2 - x^2}}, \\ \tau_{xy}^{(m)}(\alpha, 0) &= \frac{K_6 \cdot P \sin(\alpha_0 - \alpha)\theta}{\pi \sqrt{2(K_0 - 1)}} \cdot \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{(b-x)\sqrt{a^2 - x^2}},\end{aligned}\tag{14}$$

где

$$\begin{aligned}K_0 &= \frac{2\mu(\chi_1 + 1)(\chi_2 + 1)}{\mu^2\chi_2 + \mu(\chi_1\chi_2 + 1) + \chi_1} - 1, \\ K_5 &= \frac{\mu(\chi_1 + \chi_2 + 2\mu\chi_2)}{\mu^2\chi_2 + \mu(\chi_1\chi_2 + 1) + \chi_1}, \\ K_6 &= \frac{[\mu(\chi_1 + \chi_2) - 2\chi_1]\mu}{\mu^2\chi_2 + \mu(\chi_1\chi_2 + 1) + \chi_1}, \\ \alpha_0 - \alpha &= \ln \left| \frac{(a-x)(b+a)}{(a+x)(b-a)} \right|, \\ \theta &= \frac{1}{\pi} \ln \left( \sqrt{\frac{K_0 + 1}{2}} + \sqrt{\frac{K_0 - 1}{2}} \right).\end{aligned}\tag{15}$$

**Заключение.** Решены задачи теории упругости составной плоскости с трещинами. Согласно полученным результатам, при данных граничных условиях на линии контакта нормальные и касательные напряжения имеют осцилляцию, а на краях трещин, т.е. в точках  $x = \pm a$ , – особенность порядка 1/2. Полученные результаты могут быть полезны при исследовании поведения напряжений на краях контакта материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Попов Г.Я.** Концентрация упругих напряжений возле штампов, разрезов, тонких включений и подключений. – М.: Наука, 1982. – 344 с.
2. **Черепанов Г.П.** Механика разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1983. – 296 с.
3. **Акопян В.Н.** Об одной смешанной задаче для составной плоскости, ослабленной трещиной // Изв. НАН РА. Механика. – 1995. – Т. 48, № 4. – С. 57-65.
4. **Даштоян Л.Л.** Об одной смешанной задаче для составной плоскости с двумя полубесконечными трещинами // Мат. XII Респуб. конф. мол. уч. “Механика”. – Ереван, 2003. – С. 78-82.



5. **Арутюнян Л.А.** Плоская задача составной плоскости с трещиной // Междунар. науч.-техн. конф. “Архитектура и строительство”. – Ереван, 2008. – С. 34-37.
6. **Арутюнян Л.А.** Плоские задачи для составной плоскости с трещинами // Изв. НАН РА. Механика. – 2012. – Т. 65, № 3. – С. 5-9.
7. **Уфлянд Я.С.** Интегральные преобразования в задачах теории упругости. – Л.: Наука, 1968. – 401 с.

*Поступила в редакцию 08.12.2013.  
Принята к опубликованию 19.05.2014.*

**ԱՌԱՋԳԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ԽՆԴԻՐՆԵՐ ԾԱՔԵՐ ՊԱՐՈՒՆԱԿՈՂ  
ԲԱՂԱԴՐՅԱԼ ՀԱՐԹՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԱՐ**

**Լ.Ա. Հարությունյան, Մ.Ք. Սաղաթելյան**

Դիտարկվում են առաձգականության տեսության հարթ խնդիրներ բաղադրյալ հարթության համար, որը բաղկացած է երկու կիսահարթություններից՝ տարբեր առաձգական բնութագրերով և նրանց միջև վերջավոր կամ կիսաանվերջ ճաքերով: Օգտվելով Պապկովիչ-Նեյբերի հարմոնիկ ֆունկցիաներից՝ Ֆուրյեի ինտեգրալներով դիտարկվող խնդիրների համար երկբևեռ կոորդինատային համակարգում ստացվել են փակ լուծումներ: Դիտարկված են մասնավոր դեպքեր:

**Առանցքային բառեր.** բաղադրյալ մարմին, ճաքեր, երկբևեռ կոորդինատներ, Պապկովիչ-Նեյբերի ֆունկցիաներ, Ֆուրյեի ձևափոխություններ:

**PROBLEMS OF THE ELASTICITY THEORY FOR A COMPOUND PLANE  
WITH CRACKS**

**L.A. Harutyunyan, M.Q. Saghatelyan**

Plane problems of the elasticity theory for a compound plane consisting of two halfplanes with different elastic characteristics, and finite or semi-infinite cracks between them are considered. By the Fourier integral in a bipolar system of coordinates, the problems are solved in a closed way with the help of the Papkovitch-Neyber function. Concrete examples are considered.

**Keywords:** compound body, cracks, bipolar coordinates, Papkovitch-Neyber functions, Fourier transformations.

УДК 621.01

## **ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ**

**Г.А. Геворкян**

*Институт механики НАН Республики Армения*

При составлении алгоритмов динамического моделирования механизмов с упругими звеньями последние, как правило, бывают стационарной длины. Однако в связи с функциональным назначением звеньев механизмов приходится в ряде случаев их рассматривать как упругие звенья переменной длины. Предлагается динамический анализ конкретных механизмов с упругими звеньями нестационарной длины.

**Ключевые слова:** кривошипно-коромысловый механизм, кривошипно-кулисный механизм, упругое звено нестационарной длины, уравнения движения в эластодинамике.

**Введение.** Предложенная на основе обобщённого метода Ньютона-Эйлера прогрессивная методика динамического анализа упругих механизмов подтвердила свою эффективность на ряде конкретных примеров исследования динамических систем с упругими звеньями [1 - 5]. Между тем во всех ранее рассмотренных задачах упругие звенья в связи с их функциональной инвариантностью принимались постоянной длины. Настоящая статья посвящается исследованию динамических систем с упругими звеньями, являющимися в силу их функциональной изменяемости переменной активной длины.

Особенности моделирования упругих звеньев нестационарной длины по отношению к их стационарным аналогам заключаются, главным образом, в ужесточении требований, предъявляемых к оценке устойчивости решений при наличии упругих звеньев переменной активной длины. Другими словами, если при исследовании движения механизмов, содержащих неизменяемые упругие элементы, не возникает особых сложностей при достижении сходимости численных решений, то в процессе анализа одинаковой структурной сложности динамических систем, включающих в себя изменяемые упругие элементы, ответ на вопрос о сходимости решений будет, вообще говоря, непредсказуемым.

**Краткое описание механизма с переменным по длине упругим звеном.** Рассмотрим механизм простой замкнутой кинематической цепи, в структуре которого один из элементов (призматическое звено  $A_3$ ) выступает в роли камня

(рис. 1а). Упругим элементом механизма в зависимости от геометрических размеров его звеньев является либо коромысло, либо кулиса, формально-недеформированная и реально-деформированная конфигурации которых обозначаются на рис. 1 отрезком  $A_1A^*$  и дугой  $A_1A^{*'}$  соответственно.

Геометрические характеристики звеньев механизма принимаются равными  $A_1A_4 = 5a$ ,  $A_1A^* = 12a$ ,  $A_1A_2 = \sqrt{25a^2 + l_3^2}$  при  $a=0,1$  м и  $r_1 = r_3 = 3,0 \cdot 10^{-3}$  м. Аналогичным образом наперёд задаются также и физико-механические характеристики звеньев механизма  $\rho_1 = \rho_3 = 7800$  кг/м<sup>3</sup> и  $E_1 = 200$  МПа. Закон движения входного звена выражается в виде некоторой периодической функции времени:

$$q_1^r(t) = \alpha + \beta l_3 S \sin 5t. \quad (1)$$

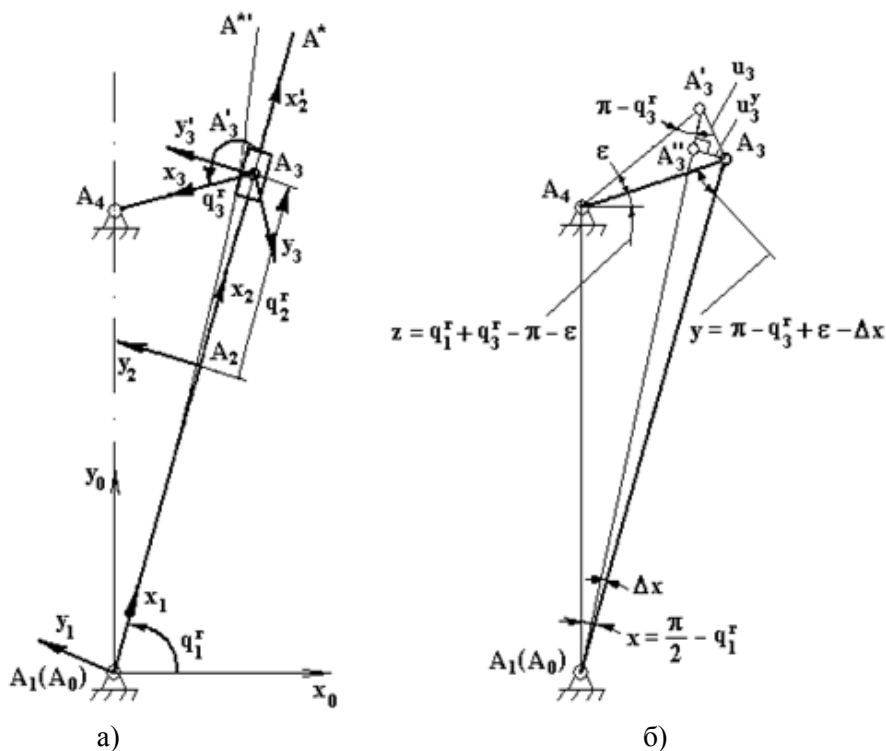


Рис. 1. Расчётная схема механизма с переменным по длине упругим звеном

**Математическая модель упругой динамической системы.** Математическое описание исследуемой упругой динамической системы (рис. 1а) с внешними геометрическими связями предполагает построение её кинематической и

динамической моделей. Формальная запись этих моделей в терминах классической механики сводится к составлению уравнений кинематических связей звеньев [1], а именно:

$$\begin{cases} {}^i\vec{V}_i = {}^iT_{i-1} \cdot {}^{i-1}\vec{V}_{i-1} + {}^iT_{i-1} \cdot {}^{i-1}\Phi_{i-1} \cdot \vec{q}_{i-1}^e + \dot{q}_i^r \vec{a}_i, & i=1, \dots, n; \\ {}^i\vec{V}_i = {}^iT_{i-1} \cdot {}^{i-1}\vec{V}_{i-1} + {}^iT_{i-1} \cdot {}^{i-1}\Phi_{i-1} \cdot \vec{q}_{i-1}^e + \ddot{q}_i^r \vec{a}_i + {}^i\vec{h}_i, & i=1, \dots, n, \end{cases} \quad (2)$$

$$(3)$$

равно как и к формированию дифференциальных уравнений движения [2], т.е.

$$\begin{bmatrix} M_{rr} & M_{r\lambda} \\ M_{\lambda r} & M_{\lambda\lambda} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{Q}^r \\ \vec{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{T} + \vec{E}_r \\ \vec{E}_\lambda^* \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $\vec{Q}^r = [\dot{q}_1^r, \dot{q}_2^r, \dots, \dot{q}_n^r]^T$  и  $\vec{T} = [T_1, T_2, \dots, T_n]^T$ , причём второе векторное уравнение в системе (4) выражает в дифференциальной форме уравнения внешних геометрических связей исследуемого упругого механизма (рис. 1б):

$$\begin{cases} 5a \cos q_1^r - l_3 \sin q_3^r = \frac{l_1^0 + l_3 \cos q_3^r + q_2^r - 5a \sin q_1^r}{l_1^0 + q_2^r} u_1^y; \\ 5a \cos(q_1^r + q_3^r) + \left( \sqrt{25a^2 + l_3^2 + q_2^r} \right) \sin q_3^r = 0. \end{cases}$$

В прикладной интерпретации математическая модель (2) – (4) упругой динамической системы с простой замкнутой кинематической цепью преобразуется в алгоритм численного динамического анализа рассматриваемого класса упругих механизмов [2]:

1. Кинематический расчёт звеньев для множества  $\{M\}$  в соответствии с (2) по первому восходящему рекурсивному обороту обобщённого метода Ньютона-Эйлера [1].

2. Определение на основании уравнений (4) обобщённых ускорений в кинематических парах системы, соответствующих подмножеству  $\{M_1\}$ , и приводных усилий – в парах, отображаемых подмножеством  $\{M_2\}$ , а также множителей Лагранжа [2], т.е.

$$\vec{X} = R^{-1} \cdot \vec{E}, \quad (5)$$

$$\dim(R) = (n+m) \times (n+m); \quad \dim(\vec{X}) = \dim(\vec{E}) = n+m,$$

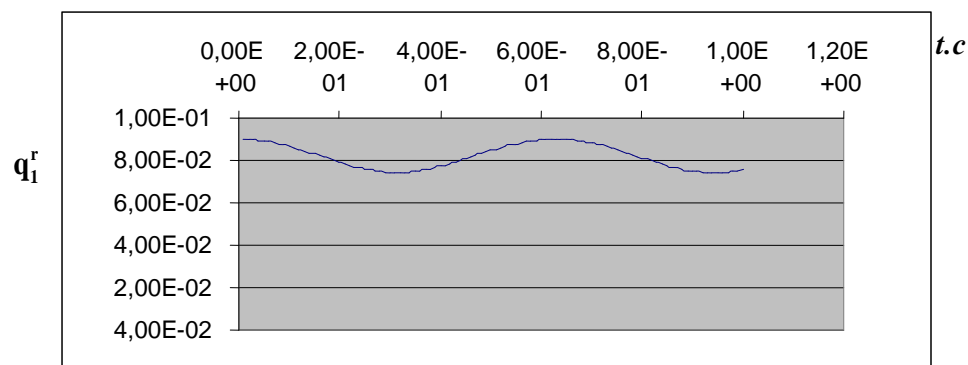
с учётом принятых в формулировке (5) следующих обозначений [2]:

$$R = \begin{bmatrix} M_{rr}^X & M_{r\lambda}^X \\ M_{\lambda r}^X & M_{\lambda\lambda}^X \end{bmatrix},$$

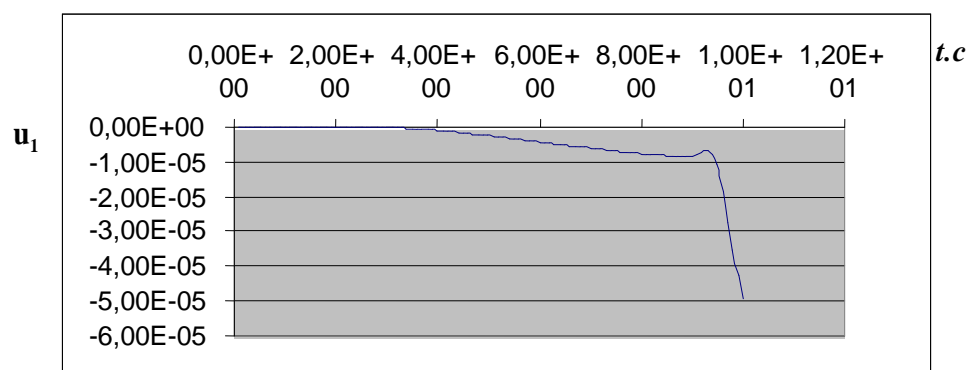
$$\vec{X} = \left[ (\vec{Q}_X^r + \vec{T})^T, \vec{\lambda}^T \right]^T \quad \text{и} \quad \vec{E} = \left[ (\vec{E}_r^X)^T, (\vec{E}_\lambda^X)^T \right]^T.$$

3. Динамический расчёт звеньев для множества  $\{M\}$  согласно (3) по третьему восходящему рекурсивному обороту обобщённого метода Ньютона-Эйлера [1].

**Случай кривошипно-коромыслового механизма с упругим коромыслом.** В первую очередь рассматривается случай, когда  $A_3A_4 = a < A_1A_4$ , т.е. когда механизм с переменным по длине упругим звеном отождествляется с кривошипно-коромысловым механизмом. Движение механизма получает определённую форму в силу задания закона движения входного звена (1) при значениях постоянных  $\alpha = \pi/2$  и  $\beta = 1$ , а также на основе фиксации начальных условий в обобщённых координатах  $q_1^r = \pi/2 \text{ рад}$ ,  $q_2^r \approx 0,0901 \text{ м}$ ,  $q_3^r = \pi \text{ рад}$ ,  $\dot{q}_1^e = 0$  и в обобщённых скоростях  $\dot{q}_1^r = 5l_3$ ,  $\dot{q}_2^r = \dot{q}_3^r = 0$ ;  $\ddot{q}_1^e = 0$ .



а)



б)

Рис. 2. Зависимости обобщённой координаты и упругих перемещений во времени

Результаты тестирования сформулированной задачи предлагаются в форме графиков зависимостей обобщённой координаты  $q_1^r$  и упругих перемещений  $u_1$  точки  $A_3$  в интервале функционирования  $[0, T]$  при  $T = 1c$  (рис. 2б). Расчётное время действия алгоритмического кода, снятое на PC PENTIUM II, составляет  $TEP = 8 \text{ мин.}$

**Случай кривошипно-кулисного механизма с упругой кулисой.**  
Исследуется случай, когда  $A_3A_4 = a > A_1A_4$ , т.е. когда механизм с переменным по длине упругим звеном ассимилируется с кривошипно-кулисным механизмом.

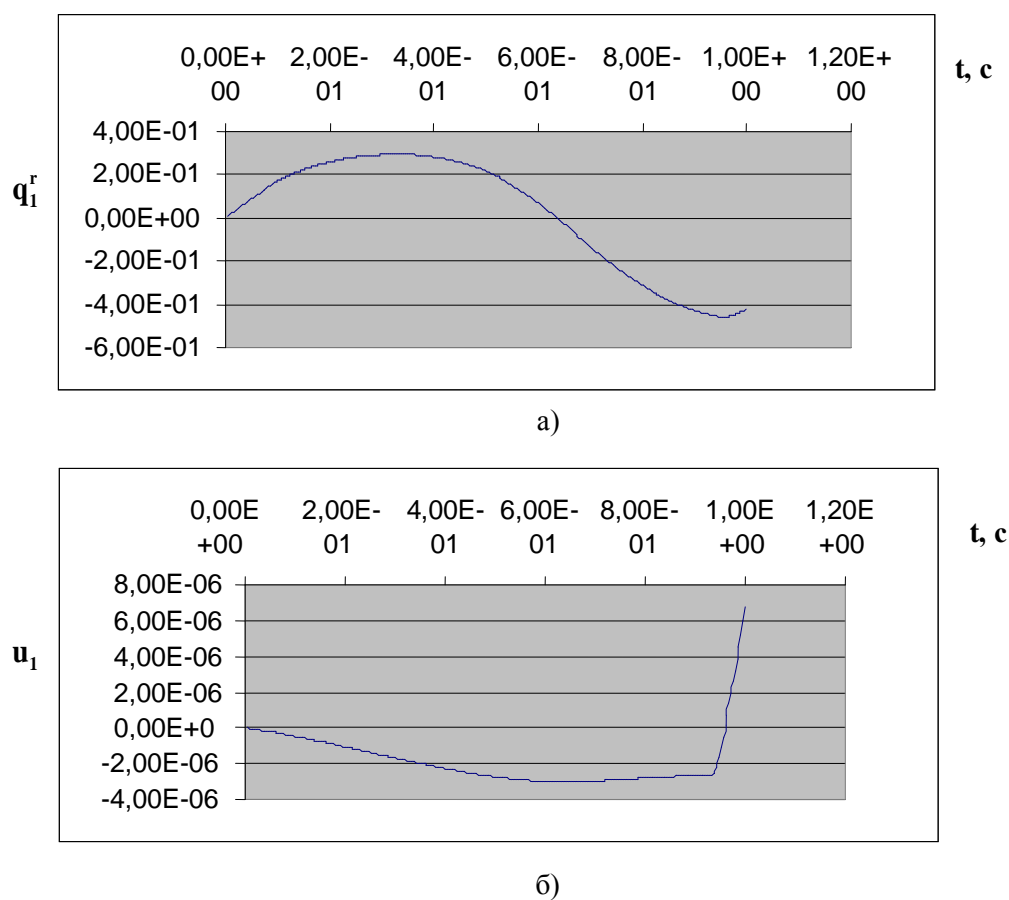
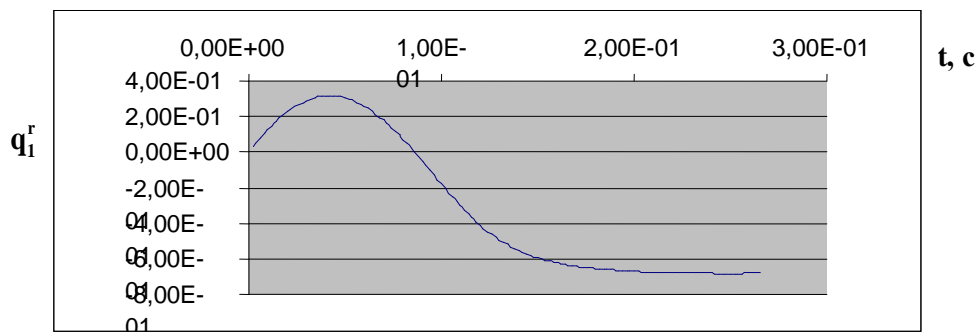


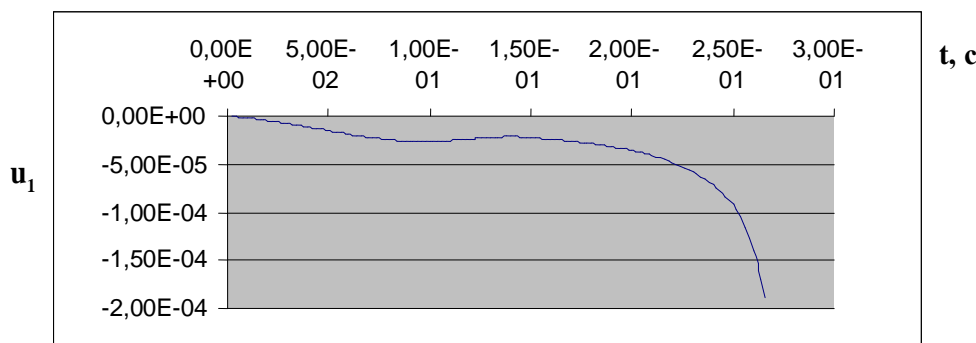
Рис. 3. Вторая пара зависимостей принципиальных характеристик

На первом этапе проводится тестирование упругого кривошипно-кулисного механизма в режиме функционирования коромысло-коромыслового механизма, соответствующего закону движения (1) в связи с привязкой констант

$\alpha \approx 0,695 \text{ рад}$  и  $\beta = 1$ , а также начальных условий в обобщённых координатах  $q_1^r \approx 0,695 \text{ рад}$ ,  $q_2^r = 0$ ,  $q_3^r \approx 2,447 \text{ рад}$ ,  $\dot{q}_1^e = 0$  и в обобщённых скоростях  $\dot{q}_1^r = 5l_3$ ,  $\dot{q}_2^r = \dot{q}_3^r = 0$ ;  $\ddot{q}_1^e = 0$ . Итоги численного решения примера показаны на рис. 3а и б. Расчётное время кода  $TEP = 3 \text{ мин.}$



а)



б)

Рис. 4. Третья пара зависимостей принципиальных характеристик

На втором этапе реализуется тестирование упругого кривошипно-кулисного механизма в полноценном режиме функционирования, а именно, в соответствии с законом движения (1) при выборе констант  $\alpha \approx 0,695 \text{ рад}$  и  $\beta = 7$ , а также начальных условий в обобщённых координатах  $q_1^r \approx 0,695 \text{ рад}$ ,  $q_2^r = 0$ ,  $q_3^r \approx 2,447 \text{ рад}$ ,  $\dot{q}_1^e = 0$  и в обобщённых скоростях  $\dot{q}_1^r = 35l_3$ ,  $\dot{q}_2^r = \dot{q}_3^r = 0$ ;  $\ddot{q}_1^e = 0$ . Результаты численной реализации примера иллюстрируются на рис. 4а и б. Расчётное время кода  $TEP = 13 \text{ мин.}$

**Заключение.** Полученные численные результаты исследований механизмов с переменными по длине упругими звеньями дают основание утверждать о возможности адекватного моделирования в условиях реального расчётного времени данного класса упругих динамических систем в широких интервалах их функционирования. Исключения составляют лишь сингулярные положения механизмов, или так называемые “мёртвые точки”, прохождение через которые может чрезвычайно затруднить (см. график на рис. 4б), а то и сделать невозможной сходимость численных решений при анализе упруго-динамических систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисян Ю.Л., Степанян К.Г., Азиз Н., Геворкян Г.А. Динамический анализ упругих манипуляторов обобщённым методом Ньютона-Эйлера // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2004. – Т. 57, № 1. – С. 3 – 10.
2. Геворкян Г.А. Динамический анализ упругих древовидных механических систем в присутствии внешних голономных связей // Информационные системы и управление. – Ереван: Энциклопедия-Армения, 2004. – № 4. – С. 36 – 43.
3. Саркисян Ю.Л., Степанян К.Г., Геворкян Г.А. Динамический анализ упругих древовидных механических систем без внешних связей // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2006. – Т. 59, № 1. – С. 3 – 9.
4. Геворкян Г.А. Динамический анализ пространственных упругих манипуляторов обобщённым методом Ньютона-Эйлера // Сб. межд. н.-т. конф., посв. 65-летию департамента “Машиностроение” ГИУА. – 2010. – С. 126 - 128.
5. Геворкян Г.А. Приложение обобщённого метода Ньютона-Эйлера к задачам оптимального управления упругих механизмов // Известия НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2010. – Т. 63, № 2. – С. 133 – 138.

*Поступила в редакцию 11.02.2014.  
Принята к опубликованию 19.05.2014.*



ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ ԵՐԿԱՐՈՒԹՅԱՄԲ ԱՌԱՋԳԱԿԱՆ ՕՂԱԿՆԵՐՈՎ  
ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ԴԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄ

Հ.Ա. Գևորգյան

Առաձգական օղակներով մեխանիզմների դինամիկական մոդելավորման ընթացքում կազմված ալգորիթմները, օղակները հանդես են գալիս հաստատուն երկարությամբ: Սակայն որոշ դեպքերում, մեխանիզմների օղակների ֆունկցիոնալ նշանակության հետ մեկտեղ, անհրաժեշտ է դրանք դիտարկել իբրև փոփոխական երկարությամբ առաձգական օղակներ: Առաջարկվում է փոփոխական երկարությամբ առաձգական օղակներով կոնկրետ մեխանիզմների դինամիկական վերլուծություն:

**Անոցքային բառեր.** շուռտվիկ-ծակավոր մեխանիզմ, շուռտվիկ-կոպիսային մեխանիզմ, հաստատուն երկարությամբ առաձգական օղակ, շարժման հավասարումներ առաձգականության դինամիկայում:

DYNAMIC MODELING OF MECHANISMS WITH  
ELASTIC LINKS OF VARIABLE LENGTH

H.A. Gevorgyan

At developing algorithms of dynamic modeling of mechanisms with elastic links, the latter, as a rule, can be of a stationary length. However, in connection with the functional purpose of the mechanism links, in some cases, it is necessary to consider them as elastic links of a variable length. A dynamic analysis of concrete mechanisms with elastic links of a nonstationary length is proposed.

**Keywords:** crank-and-rocker mechanism, crank-and-link mechanism, elastic link of nonstationary length, equations of motion in elastic dynamics.

## УСТАЛОСТНЫЙ ИЗНОС КОНЦЕВОГО ВИТКА ВИНТОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРУЖИНЫ СЖАТИЯ ПРИ ОСЕВОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Г.Г. Шекян<sup>1</sup>, В.Р. Геворгян<sup>2</sup>, У. Клетцин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики НАН Республики Армения

<sup>2</sup>Технический университет Ильменау, Германия

Методами механики контактного взаимодействия, механики разрушения и теории фрикционного взаимодействия контактирующих тел исследован процесс износа опорного витка в паре с соседствующим витком, цилиндрической винтовой пружины и получена математическая модель усталостного износа контактирующих поверхностей. Проведен численный анализ модели для различных параметров износа. Описана методика экспериментального определения коэффициентов износа.

**Ключевые слова:** усталостный износ, циклическое нагружение, поле напряжений, концевой виток.

**Введение.** При циклическом нагружении винтовых пружин, вызывающем относительное перемещение концевой витка с соседствующим, в контактном слое возникает неоднородное циклическое поле внутренних напряжений с высокими амплитудными значениями, что является причиной накопления усталостных повреждений. Результаты многих экспериментальных исследований показывают, что наиболее часто контактирующие поверхности разрушаются вследствие наклепа от циклических нагрузок высокой интенсивности, приводящих к его отслоению по усталостному механизму [1–3].

**Методы исследования.** Рассмотрим износ упругого концевой опорного витка под действием распределенной по его поверхности нагрузки, циклически изменяющейся во времени. Возникающее на поверхности витка поле напряжений вызывает наклон, который перерастает в упрочненный хрупкий слой. Дальнейшее циклическое изменение напряжений вызывает возникновение трещин, что, в свою очередь, приводит к разрушению и отслоению поверхностного слоя.

Примем, что скорость накопления повреждения после появления микротрещин в поверхностном слое  $V = \partial Q / \partial t \geq 0$  есть функция амплитудного значения  $P(t)$  нагрузки и толщины слоя  $\Delta u$ .

Введем неподвижную систему координат  $Oxyz$  (рис. 1), связав плоскость  $Oxz$  с поверхностью контакта концевой витка (плоскость  $Oxz$  касательна контактной поверхности витков), и направим ось  $Oy$  в глубь материала витка.

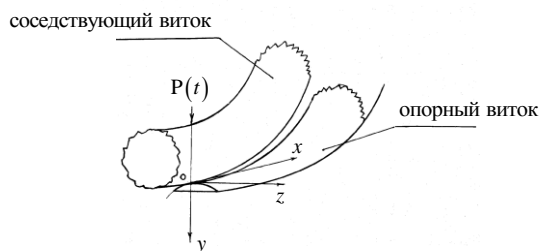


Рис. 1. Контакт опорного витка винтовой пружины с соседствующим витком

В процессе износа изменение координаты поверхности вдоль оси  $Oy$  описывается монотонно непрерывной функцией времени.

Тогда функцию накопления повреждений можно выразить выражением [5,6]

$$Q(y, t) = \int_0^t V[(y - y(t))q(t)] dt + Q_n(y), \quad (1)$$

где  $Q_n(y) = Q(y, t_n)$  – поврежденность в момент времени  $t_n$ .

Разрушение произойдет в точке  $y^*$  в момент времени  $t_*$  при выполнении условия

$$Q(y^*, t_*) = Q^*, \quad (1a)$$

где  $Q^*$  – некоторое критическое значение, при котором происходит элементарный акт разрушения.

Определим скорость поверхностного износа контактирующих витков  $dy(t)/dt$  в каждом интервале времени  $(t_n, t_{n+1})$ , в котором функция  $z(t)$  непрерывна. Для этого сначала получим уравнение для определения функции  $dt/dy$ . Поскольку  $Q(y(t), t) \equiv Q^*$ , то

$$\frac{dt}{dy} = - \frac{dQ}{dy} / \frac{dQ}{dt}. \quad (2)$$

Значения  $\frac{\partial Q}{\partial y}$  и  $\frac{\partial Q}{\partial t}$  можно найти, дифференцируя выражение (1):

$$\frac{\partial Q}{\partial y} = \int \frac{\partial V(y - y(t), q(t))}{\partial y} \frac{dt}{dy} dy + \frac{\partial Q_n(y)}{\partial y}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = V(0, q(t(y))).$$

Из (2) и (3) получим следующее интегральное уравнение для определения функции  $dt/dy$  в интервале  $(t_n, t_{n+1})$ :

$$\frac{dt}{dy} = \frac{1}{V(0, q(t(y)))} \left[ \int_v^{y_n} \frac{\partial V(y-y', q(y'))}{\partial y} \frac{dt}{dy'} dy' \right]. \quad (4)$$

Уравнение при постоянной нагрузке  $q$ , т.е. при  $P_0 = q(t)$ , есть интегральное уравнение Вольтерра второго рода. Общее решение этого уравнения, полученное с помощью преобразования Лапласа–Карсона, дано в [1, 2, 6]. Таким образом, если известны функции  $V(y, p)$  и  $Q_n(y)$ , где  $Q_n(y)$  – поврежденность, имеющая место на глубине “ $y$ ” в момент времени  $t_n$ , то можем аналитически описать процесс поверхностного износа.

В качестве примера рассмотрим процесс изнашивания, для которого монотонно убывающая функция  $V(y, q)$  имеет вид [1]

$$V(y, q) = \left(\frac{q}{q_*}\right)^N \frac{1}{T_*} \exp\left(-\frac{y}{\alpha(q)} N\right),$$

где  $q_*$  и  $T_*$  – характерная нагрузка и соответствующая ей убывающая функция до первого акта разрушения;  $\alpha(q)$  – величина, имеющая размерность длины и зависящая от действующей нагрузки  $q$ ;  $N$  – некоторая постоянная.

Предположим, что  $Q_0(t) \equiv 0$ , и нагрузка является гармонической функцией от времени:

$$q = q(t) = q_0 + q \sin \omega t.$$

При  $t = t_1$  функция  $Q_1(y) = Q(y, t_1)$  может быть определена по формуле [1]

$$Q_1(y) = \exp\left(-\frac{y}{\alpha(q_0)} N\right).$$

Применяя преобразование Лапласа по переменной “ $y$ ”, определим скорость поверхностного износа при  $t > t_1$ . Учитывая вид образа функции  $V(y, q)$

$$L[V(y, q), q] = \left(\frac{q'}{q_*}\right)^N \cdot \frac{1}{T_0} \cdot \frac{q}{q + N/\alpha(q)},$$

где

$$L[f(y), q] \equiv \int_0^t \exp(-q(y)f(y)) dy,$$

и используя (4), получим [1]

$$L\left(\frac{dt}{dy}, p\right) = \frac{NT_*}{\alpha(q_0)} \left(\frac{q_0}{q_*}\right)^N \cdot \frac{q + \frac{N}{\alpha(q)}}{q\left(q + \frac{N}{\alpha(q)}\right)}. \quad (5)$$

Применяя обратное преобразование Лапласа, будем иметь

$$\frac{dt}{dy} = \frac{NT_*}{\alpha(q_0)} \cdot \left(\frac{q_0}{q_*}\right)^N \cdot \left[-\exp\left(\frac{N}{\alpha(q_0)}y\right)\right].$$

Интегрирование этого соотношения позволяет установить связь между координатой “ $y$ ” и временем [1]:

$$t = \frac{NT_*}{\alpha(q_0)} \cdot \left(\frac{q_*}{q_0}\right)^N y - \left(\frac{\alpha(q_0)}{\alpha(q_*)} - 1\right) \left(\frac{q_*}{q_0}\right)^N T_* \left(1 - \exp\left(-\frac{N}{\alpha(q_0)}y\right)\right). \quad (6)$$

Отсюда следует, что скорость износа стремится к постоянному значению:

$$\lim_{t \rightarrow T_*} \frac{dy}{dt} = \frac{\alpha(q_0)}{NT_*} \left(\frac{q_0}{q_*}\right)^N. \quad (7)$$

В дальнейшем для определения износа используем в качестве критерия накопления усталостных повреждений величину максимальных касательных напряжений, а в качестве закона, определяющего связь этой величины со значением функции  $q(y, p)$ , – степенную зависимость [3]

$$V(y, q) = \left(\frac{\tau_{\max}(y, q)}{\tau_*}\right)^N \cdot \frac{1}{T_*} \cdot y, \quad (8)$$

где  $\tau_{\max}(z, p)$  – амплитудное значение максимальных касательных напряжений на некоторой заданной глубине “ $y$ ” от поверхности контакта.

Значения  $T_*$  и  $N$  определяются экспериментально из испытаний на фрикционную усталость (аналог параметров кривой Веллера).

**Результаты исследования.** Анализ распределения напряжений в периодических контактных задачах при различных значениях параметров, характеризующих микрогеометрию поверхности, показывает, что в случае монотонного и немонотонного изменения  $\tau_{\max}(z)$  действительно имеет место усталостное изнашивание.

Подставляя в соотношение (8) выражение для амплитудных значений  $\tau_{\max}$  на фиксированной глубине  $y$ , получим [1]

$$V(y, p) = \left(\frac{q}{q_*}\right)^{N/3} \cdot y \cdot \frac{1}{T_*} \cdot V_1\left(\frac{y}{\alpha(q_0)}\right), \quad (9)$$

где

$$V_1\left(\frac{y}{\alpha(q)}\right) = C - \frac{3}{2 \left[ 1 + \left(\frac{y}{\alpha(q)}\right)^2 \right]} - C \frac{y}{\alpha(q)} \operatorname{arctg} \left( \frac{\alpha(q)}{y} \right)^N,$$

$$C = 1 + \nu, \quad q_0 = \frac{4\pi^3 t_*^3 \cdot R^2}{(\alpha(p))^2 3E_*^2}, \quad \alpha(p) = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot \frac{P}{E_*} \cdot R}, \quad \frac{1}{E_*} = \frac{2(1-\nu_1^2)}{E}.$$

Здесь  $R$  – радиус витка;  $\nu_1$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости материала пружины.

Специфическим свойством функции  $q(y, p)$ , определяющим характер процесса изнашивания, является ее монотонность (наличие максимума на глубине  $y/\alpha(p) = 0,48$ ):

$$y \rightarrow y_{\max}.$$

Заметим, что разрушение поверхностного упрочненного слоя наступает через некоторое время после начала процесса, т.е. имеет место инкубационный период. При нагрузке  $P(t)$  продолжительность инкубационного периода  $\Delta(t)$  определяется из соотношения

$$\max(q(y, p))\Delta(t) = Q^*.$$

Нетрудно убедиться, что в безразмерных координатах  $\frac{y}{\alpha(p)}$ ,  $\theta = \frac{t}{T_*} \left(\frac{P}{P_*}\right)^N$

функция  $Q\left(\frac{y}{\alpha(q)}, \theta\right)$  не зависит от нагрузки. Следовательно, влияние нагрузки на процесс разрушения будет проявляться только в изменении пространственного и временного масштабов в соответствии с приведенной заменой координат.

Для исследования процесса разрушения, описываемого уравнениями (1), (1a) и (9), был применен численный анализ.

На рис. 2 представляется функция  $Q\left(\frac{y}{\alpha(q)}, \theta\right)$  в различные моменты времени при  $N=5$ ,  $Q_0(y) \equiv 0$ . До момента  $\theta$  первого разрушения функция  $Q\left(\frac{y}{\alpha(p)}, \theta\right)$  имеет вид кривой (I) с точкой подповерхностного максимума.

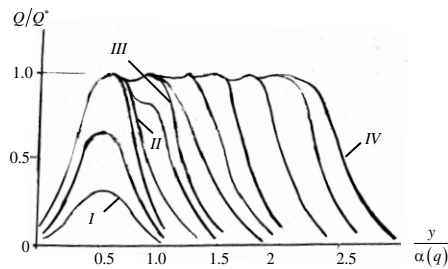


Рис. 2. Эволюция развития функции накопления поврежденности при изнашивании под действием нагрузки ( $N=5$ )

После первого подповерхностного разрушения в точке  $y_1/\alpha(q)$  функция  $Q\left(\frac{y_2}{\alpha(p)}, \theta\right)$  имеет вид монотонной кривой (II) с максимумом на поверхности контакта, характерный для процесса поверхностного износа. Далее вследствие немонотонности функции  $q(y, q)$  по “ $y$ ” возникает перегиб кривой  $Q\left(\frac{y}{\alpha(p)}, \theta\right)$  на некоторой новой глубине (кривая III).

В момент, когда величина поверхностного максимума становится равной значению  $Q^*$ , т.е.  $Q\left(\frac{y_2}{\alpha_2(q_2)}\right) = Q^*$ , происходит последующее разрушение в точке  $y_2/\alpha_2(q_2)$ . Затем подповерхностное разрушение прекращается, а скорость поверхностного износа стремится к постоянному значению. Кривая  $Q\left(\frac{zy}{\alpha(q)}, \theta\right)$  при этом приобретает вид (кривая IV), характерный для установившегося поверхностного изнашивания.

На рис. 3 представлена зависимость безразмерной координаты  $y/\alpha(q)$  поверхности от безразмерного времени  $\theta = \frac{t}{T_*} \left(\frac{q}{q_*}\right)^N$ . Момент подповерхност-

ного разрушения обозначен точкой, а цифры над графиком указывают глубину разрушения  $\Delta \frac{y}{\alpha(q)}$ , т.е. толщину отделившегося слоя.

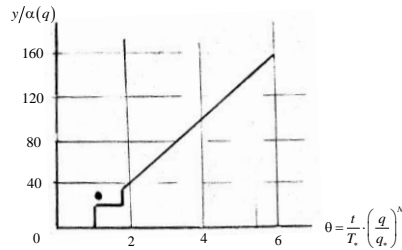


Рис. 3. Кинетика усталостного износа при циклической нагрузке с постоянной амплитудой при  $N=3$

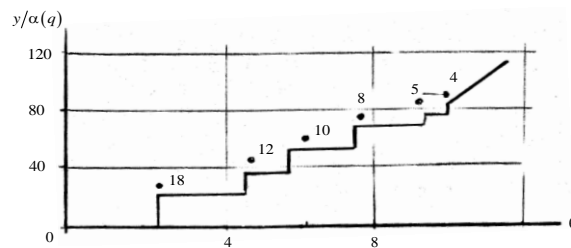


Рис. 4. Кинетика усталостного износа при изменении нагрузки с постоянной амплитудой при  $N=5$

Сравнение полученных результатов позволяет выявить влияние показателя  $N$  на кинетику изнашивания. При  $N=3$  преобладающим оказывается поверхностный износ, переход к которому осуществляется после единственного акта подповерхностного разрушения (рис. 3). При  $N=5$  происходит 6 актов подповерхностного разрушения (рис. 4), а при  $N=5,5$  – 28 актов подповерхностного разрушения (рис. 5).

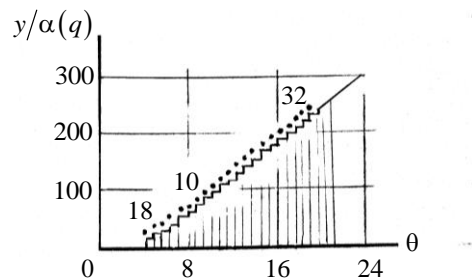


Рис. 5. Кинетика усталостного износа при  $N=5,5$



В процессе накопления повреждений, описываемых соотношениями (1) и (9), характер процессов разрушения, в зависимости от величины периода изменений, различный.

При малых периодах изменения нагрузки происходит всего несколько актов подповерхностного разрушения, а затем идет только поверхностный износ с периодически меняющейся скоростью. При увеличении периода изменения нагрузки возникает незатухающее подповерхностное разрушение, где можно выделить две стадии: начальную, когда возникновение разрушения не связано с изменением  $P(t)$ , и стадию, когда подповерхностное разрушение возникает периодически с некоторым опозданием по отношению к моменту увеличения функции  $P(t)$ , при этом число актов разрушения увеличивается с увеличением периода изменения нагрузки.

Если период изменения нагрузки мал, то система не реагирует на изменение величины  $P(t)$ , и подповерхностное разрушение прекращается. При больших периодах изменения нагрузки  $P(t)$  подповерхностное разрушение носит периодический характер и соответствует характеру изменения

$$\bar{q}(t) = \frac{P(t) \cdot 36E_*^2}{R^2 \cdot \tau_*^2}.$$

Анализ результатов исследования показывает, что если внешняя нагрузка зависит от времени, характер процесса изнашивания определяется не самой величиной нагрузки, увеличением которой, естественно, повышает среднюю скорость износа, а скоростью приращения нагрузки. На основании полученных результатов можно оценить частоту актов разрушения и величину отделяющихся фрагментов в зависимости от величины и характера приложенной нагрузки.

**Заключение.** Предложенная модель усталостного износа конечных опорных витков цилиндрической пружины при заданном периодическом изменении нагрузки позволяет воспроизвести ряд особенностей изнашивания, наблюдаемых на практике. В частности, описана возможность одновременного протекания непрерывного (поверхностного) и дискретного разрушений при едином механизме накопления повреждений.

Имея модель функции  $q(u, p)$ , можно предложить метод экспериментального определения параметров усталостного износа в соответствии с (9).

Зависимость усталостного износа  $Q(t)$  от времени можно получить экспериментально при заданных значениях радиуса витка пружины и нагрузке  $P(t)$ . Если полученная экспериментальная зависимость качественно подобна принятым моделям, т.е. модель адекватно описывает процесс изнашивания в

экспериментальных условиях, то величины  $N$ ,  $(q_*)^{N/3}$  и  $T_*$  в соотношении (9) могут быть определены из анализа характеристик режима изнашивания.

С этой целью рассмотрим скорость износа при нагрузке  $P(t)$ . В случае, когда  $P(t) = const$ , при установившемся режиме имеет место только поверхностный износ с постоянной скоростью  $dy/dt$ , которая определяется из соотношения (9) и формулы

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{Q^*} \int_0^{y_{\max}} V(y, q_0) dy. \quad (10)$$

С учетом (9) и (10) имеем

$$\frac{dy}{dt} = \left(\frac{q}{q_*}\right)^{N/3} \cdot \frac{1}{T_*} \left(\frac{3qR}{E_*}\right) \cdot \int_0^{z_{\max}} q_1 \left(\frac{y}{\alpha(q)}\right) \frac{dy}{\alpha(q)}. \quad (11)$$

Измерив экспериментально скорость износа  $dy_1/dt$  и  $dy_2/dt$  для двух величин нагрузки  $P_1(t)$  и  $P_2(t)$ , из соотношения (11) можем определить  $N$ :

$$N = 3 \cdot \frac{\ln(y_1/y_2)}{\ln(P_1/P_2)} - 1.$$

Значение  $(P_*)^{N/3} \cdot T_*$ , входящее в (9), может быть рассчитано на основании (9) и (11).

Подобный метод может быть применен и для других функций  $V(y, q)$ , описывающих повреждения в экспериментах с различными материалами и различными условиями взаимодействия.

Основным недостатком изложенной модели усталостного износа является ее одномерный характер (износ в направлении координаты  $y$ ). С помощью этой модели можно описать только один частный вид поверхностного разрушения – отслаивание поверхностных слоев в результате усталостного износа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шекян Г.Г., Геворгян В.Р., Клетцин У.** Износ клапанных пружин двигателей внутреннего сжатия // Вестник ГИУА. Серия “Механика, Машиноведение, Машиностроение”. – 2012. – Выпуск 15, № 2. – С. 58–66.
2. **Шекян Г.Г., Клетцин У., Геворгян В.Р.** Распределение давления по опорной поверхности концевой витка цилиндрической винтовой пружины сжатия // Материалы Межд. науч.-техн. конф. “Технологии и техника автоматизации – 2010”. – Ереван, 2010. – С. 133–138.
3. **Шекян Г.Г., Геворгян В.Р.** Колебания предварительно сжатой цилиндрической пружины // Труды VII Международной конференции “Проблемы динамики

взаимодействия деформируемых сред” / Институт механики НАН РА. – Ереван, 2011. – С. 419–427.

4. **Крагельский И.В.** Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
5. **Горячева И.Г.** Расчетная оценка износа двигателей внутреннего сгорания. Трение и практика расчета деталей машин на износ. – М.: Наука, 1983. – 585 с.
6. **Галин Л.А.** Контактная задача теории упругости при наличии износа. Теория трения, износ и проблема стандартизации. – Брянск, 1978. – 295 с.

*Поступила в редакцию 05.03.2014.  
Принята к опубликованию 19.05.2014.*

**ՊՏՈՒՏԱԿԱՅԻՆ ԳԼԱՆԱԿԱՆ ՍԵՂՄՄԱՆ ԶՍՊԱՆԱԿԻ  
ԾԱՅՐԱՅԻՆ ԳԱԼԱՐԻ ՀՈԳՆԱԾԱՅԻՆ ՄԱՇՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆԸ  
ԱՌԱՆՑՔԱՅԻՆ ՑԻԿԼԻԿ ԲԵՌՆՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ**

**Հ.Գ. Շեկյան, Վ.Ռ. Գևորգյան, Ս.Ի. Կլետցին**

Հպակային փոխազդեցության մեխանիկայի, քայքայման մեխանիկայի և հպվող մարմինների շփմամբ փոխազդեցության տեսության մեխանիկայի մեթոդներով ուսումնասիրվել է սեղման գլանական զսպանակի հենարանային գալարի՝ հարևան գալարի հետ զույգում մաշման գործընթացը, և ստացվել է հպվող մակերևույթների հոգնածային մաշվածության մաթեմատիկական մոդելը: Կատարվել է մոդելի տարբեր պարամետրերի մաշվածության թվային վերլուծություն: Նկարագրվել է մաշվածության գործակիցների փորձարարական որոշման մեթոդաբանությունը:

**Առանցքային բաներ.** հոգնածային մաշվածություն, ցիկլիկ բեռնավորում, լարվածային դաշտ, ծայրային գալար:

**FATIGUE WEAR OF A TAIL-PIECE OF A HELICAL CYLINDRICAL  
COMPRESSION SPRING AT AXIAL CYCLIC LOADING**

**H.G. Shekyan, V.R. Gevorgyan, U. Klettsin**

By the methods of the contact interaction mechanics, destruction mechanics and the theory of frictional interaction of the contacting bodies, the wear process of the supporting turn together with the neighboring helical cylindrical spring is investigated. A mathematical model of the fatigue wear of contacting surfaces is obtained. The method of experimental determination of the wear coefficient is described.

**Keywords:** fatigue wear, cyclic loading, stress field, tail- piece.

## VIRTUAL MECHANISMS FOR FEATURE ANALYSIS OF VIPER GRIP LOCKING PLIERS

**H.V. Darbinyan<sup>1</sup>, B.P. Seber<sup>2</sup>, V.H. Darbinyan<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*“Shanghai Kunjek Handtool & Hardware Co.” Ltd, Shanghai, China*

<sup>2</sup>*“Sebercor” LLC, USA*

<sup>3</sup>*State Engineering University of Armenia (Polytechnic)*

A calculating method based on creating a virtual mechanism is applied for the analysis of the locking plier characteristics. Appropriate models are created for cam mechanism transmission ratio calculation and for quantification of such characteristics of Viper Grip locking pliers as handling convenience and energetic ratio. A proper excel based calculating algorithm is developed and numerical results are obtained.

**Keywords:** Cam mechanism, virtual mechanism, energetic ratio, handling convenience, locking pliers, calculating algorithm.

**Introduction.** The function and feature analysis of a product is an important phase of its design including the evaluation of its properties, the comparative analysis with similar products and setting the direction of a novel product development. Quantification of features allows to have much specific knowledge for the product's performance against intuitive and subjective judgement. For feature quantification, the physical diagram of a product should be translated into kinematic diagram which, in general, is responsible for major properties specific for the type of the mechanism used. This mechanism, being enough to describe and provide the key feature, is not enough to describe more features which can be equally important and essential for the product performance. Thus, the issue of forming mechanical structures beyond the main kinematical structure for describing the additional and sometimes equally essential features of the product is methodically necessary and practically actual. The purpose of this paper is to develop and apply virtual mechanisms for describing and quantifying such features of locking pliers as the energetic transmission ratio and the handling convenience of the product. Another task is to create a calculating model for the transmission ratio of the cam mechanism used in a novel structure of locking pliers - in Viper Grip locking pliers. The paper ends with a comparative analysis of regular lock pliers features with the novel structure, as well as with the validation of the theoretical results of transmission ratio of viper grip pliers with the results of physical testing.

Tasks and objectives:

1. Creating submechanisms for calculation of energetic features, convenient handling features of locking pliers.
2. Creating an Excel based calculation algorithm for effective and large scale calculation implementation.
3. Applying a calculation algorithm for two pliers: Regular Locking Pliers and Viper Grip Locking Pliers.
4. Analyzing and making the necessary conclusions for the calculation results for different locking pliers.

**What are a novel Viper grip locking pliers?** A novel Viper Grip Locking Pliers [1,2] are developed in response to hand tool growing and competitive market demand for hand tools with different and advantageous features. Pliers have a self adjustable feature for approaching an object to the clamp. This feature is achieved by separating the force generating chain from the adjustable feature chain. The force generating chain includes a four-bar mechanism in which the crank and the connecting rod make an angle close to 180 degrees for a high output force development and a cam mechanism for further multiplication of the force. A specific toothed clutch mechanism is used for pliers' general mechanism reconfiguration into working structures serving as different functional modes. Omitting a detailed description of Viper Grip Lock Pliers structure in this paper, we concentrate on the establishment of simplified kinematic diagram including the major four linkage and cam mechanisms and missing other sub chains. This simplification provides sufficient data for the analysis and calculation of such features as the transmission ratio, the distance between the handles and the energetic feature.

**Creating a virtual mechanism for the cam mechanism force transmission ratio calculation.** The Viper Grip Locking Pliers (Fig. 1) include a four-bar mechanism  $ABCD$  and a cam mechanism  $ASV$  (Fig. 2) both responsible for multiplication of the force generated by the user's hand and ended on the object that should be locked. The distribution of total transmission ratio into two chains is beneficial for limiting the travel of the connecting rod in a four-bar mechanism and taking the advantage of the limited distance between the handles as a measure for another feature of locking pliers as a handling convenience. The transmission ratio of the four-bar mechanism is already reviewed [3]. Now, the virtual mechanism method will be used to create a calculating model for the cam mechanism transmission ratio calculation. The structure of the Viper Grip includes two consecutive chains of a four-bar mechanism and a cam mechanism where the output link of the four-bar mechanism is the input link of the cam mechanism.

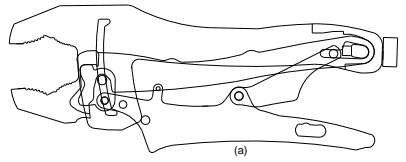


Fig. 1. Physical diagram of a Viper Grip Lock Pliers

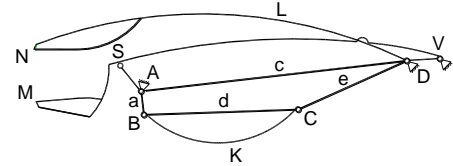


Fig. 2. Kinematic diagram of a Viper Grip Lock Pliers

The calculating method [3] implies the presentation of a four-bar mechanism and the forces loaded on it by an open kinematic chain including the virtual links connected by prismatic and revolute joints.

Fig. 3 shows a four-bar mechanism loaded by input and output forces and Fig. 4 is the calculating model used in [3] for analytical calculation of the force transmission ratio of a four-bar mechanism.

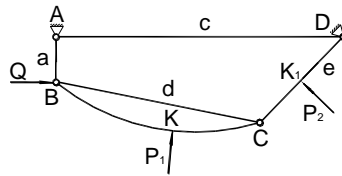


Fig. 3. A four-bar mechanism loaded by forces

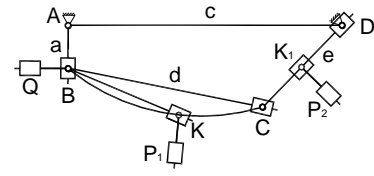


Fig. 4. Calculating models for the transmission ratio provided by a four-bar mechanism

The model for simulating a standard four-bar mechanism utilized both in the regular and Viper Grip locking pliers is shown as an open chain (1) tracking the four joints of the mechanism and presented as a product of matrices for the link rotations and displacements:

$$r_A = \alpha - a - \beta - d - \gamma - e - \varepsilon - c - e_3, \quad (1)$$

where  $e_3$  is the unit matrix at coordinate system origin.

The construction of the second model (Fig. 5) for a cam mechanism is based on the judgements below. The input link of the cam mechanism (the cam) is shown in its two end positions relating to the maximum swing of the output link of the four-bar mechanism (it is the same with the cam). The cam follower of a flat type has the work plain  $UV$  tangent to the cam surface and passing through the cam follower rocking point  $V$ . So the continuation of the virtual mechanism construction is followed by adding the link  $UV$  from the second end position  $V$  of the cam mechanism input link.

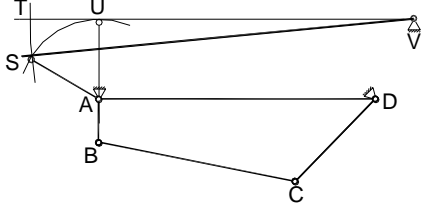


Fig. 5. Simulation of Viper locking pliers cam mechanism

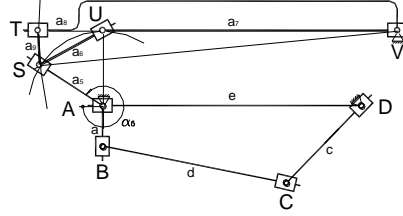


Fig. 6. Open chain including the pliers' four-bar and cam mechanisms

The next step is to find the original contact point of the cam follower in the flat surface  $UV$  corresponding to the original contact of the cam and the cam follower. For this purpose, the next position of the virtual mechanism link is directed from the point  $V$  back to the point  $U$ , and continued to the point  $S$  showing the shortest distance to the original contact point  $T$  of the cam in the perpendicular to the radius  $UV$  direction.

The further addition of a link connecting the original  $S$  and the end  $U$  contact points of the cam gives the possible displacement of the cam's working point. The ratio of this displacement to the cam follower's corresponding displacement defined by the length of the link  $UV$  will show the force transmission ratio of the cam mechanism according to the principle of possible displacement of the cam and the cam follower:  $F_c T_c = F_{cf} T_{cf}$  which gives the transmission ratio formula defined by the displacements:  $i = SU / ST$ .

For the sake of the structure completeness, the description of the cam mechanism is started not directly from its input link but from the output link of the four-bar mechanism including its four links and then continued by the input link of the cam mechanism (Fig. 6).

The virtual chain (2) for describing the force transmission mechanism due to the cam connection includes the following links and movement parameters:

$$r_{A-S} = \alpha_5 - a_5 - \alpha_6 - a_6 - \alpha_7 - a_7 - \alpha_8 - a_8 - \alpha_9 - a_9 - e_3. \quad (2)$$

The integral mechanical chain includes the two chains above, and is composed as their consecutive connection (3):

$$r_s = \alpha - a - \beta - d - \gamma - e - \varepsilon - c - \alpha_5 - a_5 - \alpha_6 - a_6 - \alpha_7 - a_7 - \alpha_8 - a_8 - \alpha_9 - a_9 - e_3. \quad (3)$$

Those chains include the necessary data and allow to calculate the force transmission ratio provided by the four-bar mechanism (4) and by the cam mechanism (5), and the total force transmission ratio (6):

$$i_{4bar} = P_1 / Q, \quad (4)$$

$$i_{cam} = SU / ST = a_6 / a_9, \quad (5)$$

$$i_{total} = i_{abar} i_{cam} = P_1 a_6 / Q a_9. \quad (6)$$

The results of calculating the mentioned features are in the next chapter below. It should be noted that the procedure of the virtual chain and mechanism construction is possible under the condition of full definition of angular and linear displacements of the links and points confirmed by geometrical definite (certainty) of the implemented constructions. Definitions of angular and linear parameters of displacements are omitted due to the clarity and simplicity.

**Quantification of easy handling feature.** The convenience of handling is the next feature describing the usage of locking pliers. The distance between the touching points on the tool handles ergonomically acceptable for a convenient usage (50...120 mm) and the limited travel of the handle are describe better conditions for tool handling and usage at different modes of tool application. Fig. 7 and 8 show a general kinematic diagram and a calculating model for the handling convenience of regular locking pliers. Fig. 9 and 10 are the same for Viper Grip Lock pliers where the proper virtual chains are constructed for calculating the coordinates on the frame of the tool (point L) and the handle (point K) loaded by the user's fingers. The virtual mechanisms are extended to handle the touching points by the user's fingers.

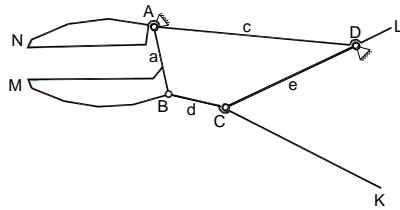


Fig. 7. Kinematic diagram of a regular Lock Pliers

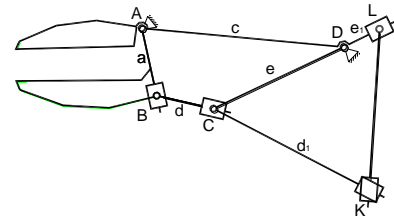


Fig. 8. Calculative model for evaluating handling convenience (Regular Lock Pliers). Model for handling distance calculation

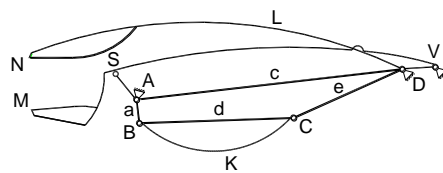


Fig. 9. Kinematic diagram of a Viper Grip Lock Pliers

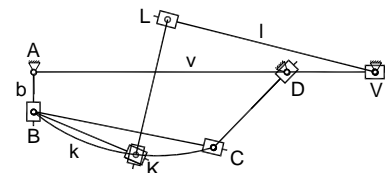


Fig. 10. A calculative model for evaluating the handling convenience



The distance (9) between the points  $K$  and  $L$  is measured as the difference of the radius vectors (7) and (8) that is a quantifying measure to evaluate the handling convenience of the locking pliers to be within a range of 50 to 120  $mm$  and be stable along the entire range of the input parameter variation.

$$r_L = \beta_v - v - \beta_l - l - e_3, \quad (7)$$

$$r_K = \beta_b - b - \beta_k - k - e_3, \quad (8)$$

$$\Delta r_{LK} = r_L - r_K = \begin{vmatrix} x_L - x_K \\ y_L - y_K \end{vmatrix}. \quad (9)$$

The calculation results are shown in the next part.

**Quantification of the energetic feature.** The energetic feature ( $i_E = E_K / E_M$ ) is a measure to evaluate the effectiveness of the tool in the terms of energy transmission. It is considered as the ratio of energy  $E_K$  (10) wasted by the user to move the handle and energy  $E_M$  (11) generated by tool jaws to lock an object.

$$E_K = \sum_{i=1}^n P_i \Delta s_{P_i} \cos(P_i \Delta s_{P_i}), \quad (10)$$

$$E_M = \sum_{i=1}^n Q_i \Delta s_{Q_i} \cos(\overbrace{Q_i \Delta s_{Q_i}}), \quad (11)$$

where  $P_i$  and  $Q_i$  are the forces applied to the mechanism (Fig. 11), ( $P_i \Delta s_{P_i}$ ) and are angles concluded between the force and displacement vectors.

The supporting virtual chains are constructed for two consecutive positions of the locking process corresponding to the incremental movements of the input link (Fig. 12a). Each chain includes two subchains for input and output forces, where the forces are presented as virtual links with the direction and length in accordance with the direction and modulus of forces (Fig. 12b).

Displacements  $\Delta s_i = r_{i+1} - r_i$  of two consecutive coordinates are calculated as difference of the radii vectors defined by:

$$r_{i+1} = \alpha_{i+1} - a - \beta - d_1 - e_3, \quad (12)$$

$$r_i = \alpha_i - a - \beta - d_1 - e_3. \quad (13)$$

The incremental energy for each step is calculated and the integral value as the sum of incremental energies is computed in (10) and (11).

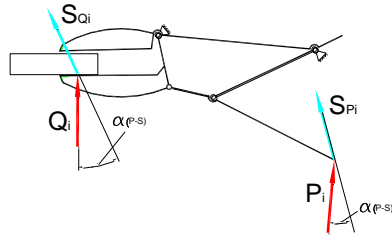


Fig. 11. Displacements on input and output links

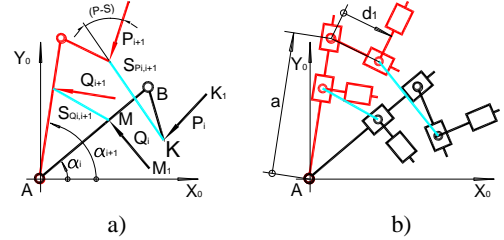


Fig. 12. An energetic feature calculation model

**Computing procedure and results.** A MACRO based Excel program is developed according to the analytical approach above. The program requires a set of input parameters and provides a computation of output parameters shown in the table below.

Table

Summary of input and output parameters for Viper Grip feature analyzes

INPUT PARAMETERS		OUTPUT PARAMETERS	
parameter	nomenclature	parameter	nomenclature
Input parameter	$\alpha_0$	Four-bar ppattern angles	$\beta, \gamma, \varepsilon$
Length of links, mm	$a, d, e, c$	Distance between handles, mm	$H$
Loading forces, N:	$P_1$	Distance between jaws, mm	$J$
<ul style="list-style-type: none"> <li>Application point</li> <li>Direction</li> <li>Modulus</li> </ul>	$d_1$ $\lambda_1$ $[P_1]$	Force transmission ratio (TR)	$i_{(four-bar)}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>four-bar mechanism</li> <li>cam mechanism</li> <li>total TR</li> </ul>			$i_{cam}$ $i_{total}$
Loading forces, N:	$P_2$	Energy consumed on the handle, Nm	$E_h$
<ul style="list-style-type: none"> <li>Application point</li> <li>Direction</li> <li>Modulus</li> </ul>	$e_1$ $\lambda_2$ $[P_2]$	Reactions in the kinematic joints:	$R_{12}^t$ $R_{12}^n$ $R_{43}^t$ $R_{43}^n$
Balancing force, N:	$Q$	Momentum on the input link	$M_1$
		Effective angle	$\gamma_z$
<ul style="list-style-type: none"> <li>Application point</li> <li>Direction</li> <li>Modulus</li> </ul>	$\alpha_0$ $\lambda_0$ unknown	Balancing force, N:	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Modulus</li> </ul>	$Q$
Tool handling coordinates	$c_2, \alpha_{c2}, a_1, \beta_{a1}, d_2, \gamma_{d2}, c_1, \varepsilon_{a1}$		

Calculation in Excel format is implemented in the following steps.

1. The output (input) link travel range is specified.
2. First the range of the output link is determined by two limitations: first, the angle between the connecting rod and the crank should be close to 180 degrees (145...175 degrees) to provide a high clamping and locking force; second, the handle and the jaw should be within a reasonable range first to provide the necessary service range, and second, to provide an ergonomically convenient value for handling the pliers based on the given range of angles between the connecting rod and the crank.
3. Later, the output set of parameters is computed for a small enough increment of the input parameter ( $\alpha = 7^\circ$ ,  $\Delta\alpha = 0,7^\circ$ ).

The calculation is carried out (repeated) for the whole range of the locking process, and the variable of transmission ratio is established.

The results of the Excel based calculations are summarized in the tables below (Fig. 13-16).

Further optimization is required to find the best combination of parameters for having a balanced set of features, as well as physical testing for confirming the theoretical results achieved in this paper.

The method developed can be extended and applied for other types of two linkage groups including different combinations of rotational and prismatic joints, as well as for the cam mechanism.

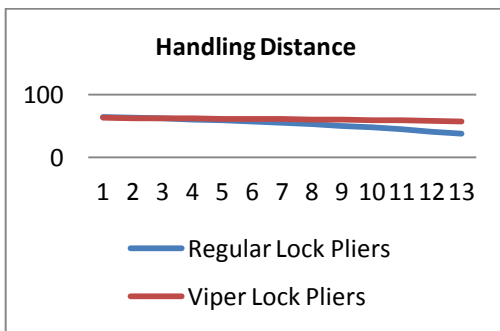


Fig. 13. Features for regular and Viper grip locking pliers(handling distance)

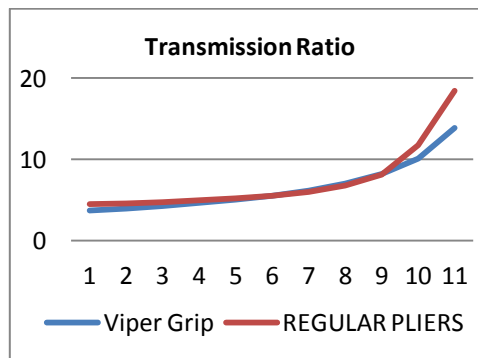


Fig. 14. Features for regular and Viper grip locking pliers(transmission ratio)

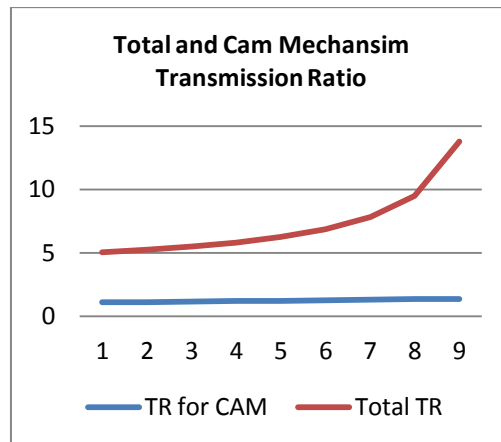


Fig. 15. Features for regular and Viper grip locking pliers (total and cam mechanism TR)

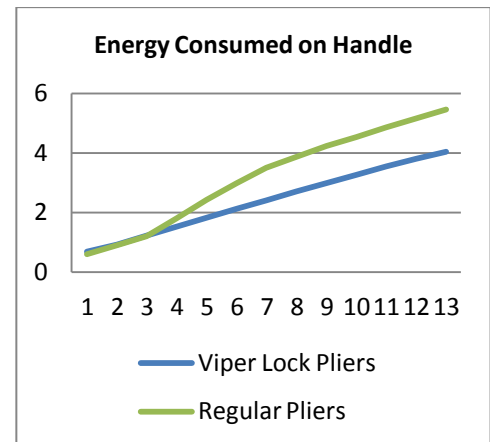


Fig. 16. Features for regular and viper locking pliers. Energy consumed on handle

### Conclusions

1. Application of prismatic and revolute jointed virtual mechanisms allows to calculate such features of Viper Grip Locking Pliers as the force transmission ratio, the energetic transmission ratio and the handling convenience.

2. A MACROS-based calculating algorithm developed on the application of virtual mechanisms provides an easy output of the required features of the locking pliers and other mechanical devices based on the usage of one type of a four-bar mechanism depending on the input parameter, the length of the bars and the forces applied to the mechanism.

3. The results of the force transmission analytical calculation and physical testing precisely show the accuracy and validity of the calculation method developed.

### REFERENCES

1. U.S. Design Patent No. D499, 320. Self-adjusting Pliers / **B.P. Seber**. – 2004.
2. U.S. Patent No. 7, 444, 907. Self-adjusting Pliers / **B.P. Seber**. – 2008.
3. **Darbinyan H.V., Seber B.P.** A method for the force analysis of a four-bar mechanism of Viper locking grip pliers // SEUA Proceedings. Series “Mechanics, Machine science, Machine-building”. – 2014. – Issue 16, № 2. – P. 77-83.

*Received on 08.08.2013.*

*Accepted for publication on 19.05.2014.*

**ՊԱՅՄԱՆԱԿԱՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԻ ԿԱՌՈՒՑՈՒՄԸ ՍԵՎԵՌՈՂ ԲՆՕՐԻՆԱԿ  
ՏԱՓԱՇՈՒՐԹԻ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԱՐ**

**Հ.Վ. Դարբինյան, Բ.Պ. Սեբեր, Վ.Հ. Դարբինյան**

Պայմանական մեխանիզմների կառուցման վրա հիմնված հաշվարկային եղանակը կիրառված է սևեռող բնօրինակ տափաշուրթի ընդհանուր և դրա բոնցքային մեխանիզմի փոխանցման թվի հաշվարկի, տափաշուրթի օգտագործման հարմարության ցուցանիշի քանակական վերլուծության և էներգետիկ փոխանցման թվի որոշման համար: Excel միջավայրում մշակված է համապատասխան հաշվողական ալգորիթմ, ստացված են թվային օրինակներ:

**Առանցքային բառեր.** բոնցքային մեխանիզմ, պայմանական մեխանիզմ, էներգետիկ փոխանցման թիվ, օգտագործման հարմարության ցուցանիշ, սևեռող տափաշուրթ, հաշվողական ալգորիթմ:

**ПОСТРОЕНИЕ УСЛОВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ АНАЛИЗА СВОЙСТВ  
ОРИГИНАЛЬНЫХ ЗАПИРАЮЩИХ ПАССАТИЖЕЙ**

**Г.В. Дарбинян, Б.П. Себер, В.Г. Дарбинян**

Представлен расчетный метод, основанный на построении условных механизмов. Метод используется для определения общего передаточного числа запирающих пассатижей, включающих также кулачковый механизм, а также для количественного анализа показателя удобного использования пассатижей и определения энергетического передаточного числа. В среде Excel разработан соответствующий вычислительный алгоритм, приведены численные примеры.

**Ключевые слова:** кулачковый механизм, условный механизм, энергетическое передаточное число, показатель удобного использования, запирающие пассатижи, вычислительный алгоритм.

УДК 621.96

## **СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ**

**С.Ш. Христафорян, Э.С. Христафорян, А.Л. Аршакян**

*Государственный инженерный университет Армении (Политехник)*

Рассматриваются теоретические и технологические аспекты разработки технологии изготовления поверхностей пары трения с повышенными показателями трибологических характеристик, в частности, возможности улучшения условий проникновения в контакт смазывающих веществ без ущерба точностных характеристик и качества поверхностей деталей пары трения.

**Ключевые слова:** ультразвук, лезвийное резание, обкатка, рельеф поверхности.

**Введение.** Развитие современной техники требует повышения точности подвижных соединений, что способствует улучшению качества обработанных поверхностей, так как высокая точность подвижного соединения достигается при соответствующих допусках на посадку. Это приводит к трудно преодолимым задачам, связанным с необходимостью изготовления поверхностей весьма малой шероховатости, что возможно применением современных технологий хонингования, суперфиниша и размерной полировки. Однако отмеченные условия, с одной стороны, приводят к снижению возможности обеспечения смазки поверхностей, а с другой – к повышению уровня атомарного взаимодействия поверхностей, способствующего возникновению очагов схватывания и вызывающего катастрофический износ поверхностей, т.е. снижаются долговечность, работоспособность и надежность подвижного соединения, а вместе с ним – и всей техники. Получается замкнутый круг. С одной стороны, изготовление подвижного соединения высокого качества обходится весьма дорого и не всегда рентабельно, а с другой – эксплуатация такого соединения приводит к снижению долговечности средства техники.

Отметим, что современные смазывающие вещества весьма эффективны, но их надо привести в подвижное соединение, что не всегда успешно осуществляется ввиду высокой их вязкости. Менее вязкие смазки на поверхности трудно удерживаются, стекают или легко выдавливаются. Следовательно, задача сводится к разработке технологий, обеспечивающих возможность формирования на обработанной поверхности специального

трибологического рельефа без ущерба требованиям по точности соединения, т.е. подвижности посадки. Показателен пример сочленения цилиндр - кольцо двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

В этом направлении проводятся масштабные исследования и получены определенные результаты. Обсудим некоторые из них. Так, после операций хонингования цилиндра ДВС и последующего микрополирования достигается такой уровень шероховатости поверхности, который вполне удовлетворяет требованиям по посадке (рис. 1).

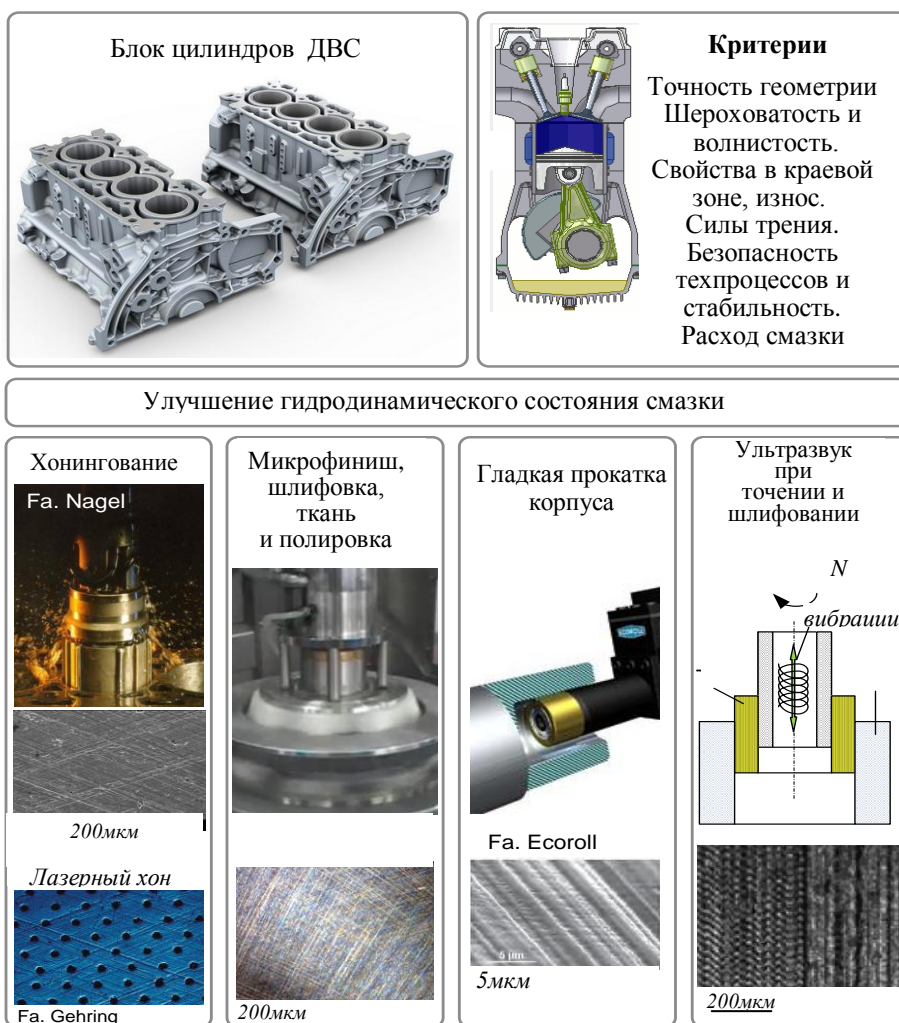
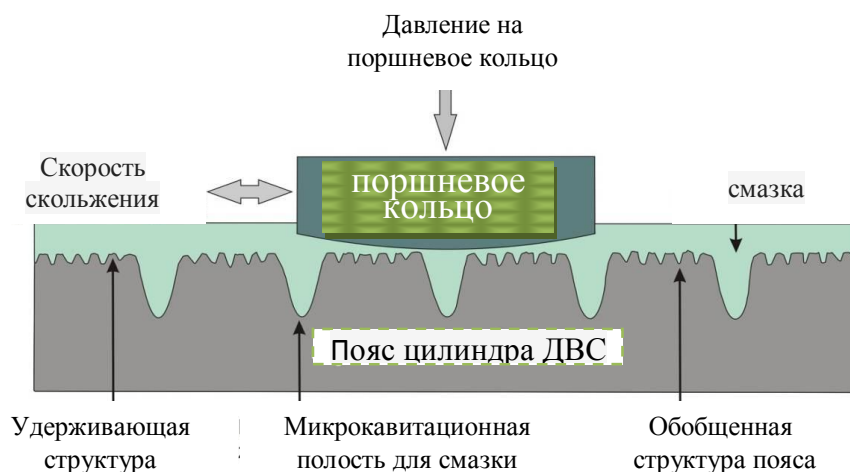
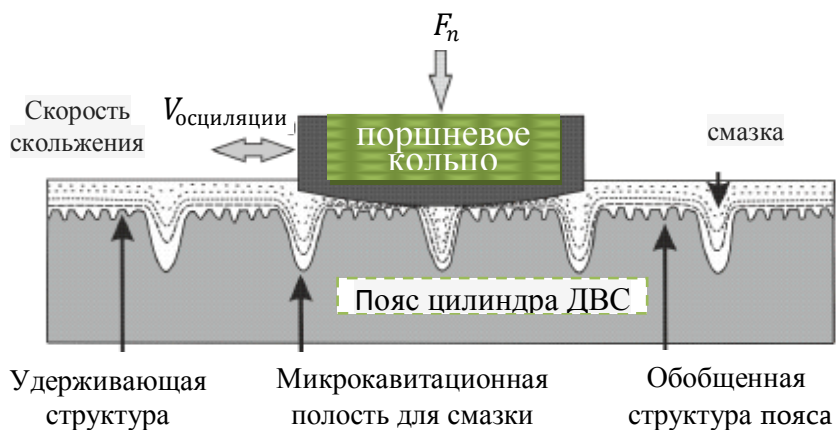


Рис. 1. Некоторые технологические варианты формирования на поверхности специального трибологического рельефа

Затем (данные университета им. Отто-фон-Герике, Магдебург, Германия) различными технологиями на уже готовой поверхности подготавливается специальный рельеф. При этом предпочтение отдается лазерным технологиям и обкатке (рис. 2). Каждая из них имеет свои недостатки и, в первую очередь, по показателю производительности.



а)



б)

Рис. 2. Схемы контакта цилиндра с трибологическим рельефом и поршневого кольца, имеющего безусловную бочкообразность, позволяющую при взаимном перемещении за счет кавитационных явлений выдавливать смазку в зону контакта



В нижнем правом углу представлен микрорельеф поверхности, полученный ультразвуковым (УЗ) резанием в ГИУА [1]. Множество микрофотографий поверхностей, обработанных УЗ резанием в лаборатории “Ультразвуковая техника и технологии” ГИУА, явились основой для проведения в рамках гранта Volkswagen-а масштабных исследований по разработке технологии структурирования специальных трибологических структур на обработанной поверхности. Отметим, что по программе исследований предусматривалось масштабно исследовать процесс УЗ резания и получить поверхности, которые в дальнейшем, после тонкой абразивной обработки и хонингования, сохраняют следы от лезвийной обработки и будут обладать лучшими свойствами удерживать смазку и высокой работоспособностью. Условная схема контакта приведена на рис. 2.

В этом направлении науки, имеющем высочайшую важность для развития техники, определенные достижения имеет университет им. Отто-фон-Герике (Магдебург) (научный руководитель темы проф. Б. Карпушевский и сотрудники). Актуальность проблемы не вызывает каких-либо сомнений, и для машиностроительной науки поиск новых технологических решений формирования специальных трибологических структур на поверхностях деталей техники высокой точности является необходимым. На рис. 3,4 приведены схемы обработки для достижения необходимых целей.

**Результаты исследования.** Согласно программе договора, предполагались исследования, которые должны были проводиться в лаборатории “Машиностроительные технологии” ГИУА. Задачи исследования:

- выявление возможности формирования трибологических структур на поверхностях, обработанных способом лезвийного резания;
- выявление возможности сохранения на поверхностях трения трибологических структур, полученных лезвийным резанием, после последующих технологических операций тонкого шлифования и хонингования;
- выявление предпосылок для разработки новой технологии формирования трибологических структур на обработанных поверхностях пары трения.

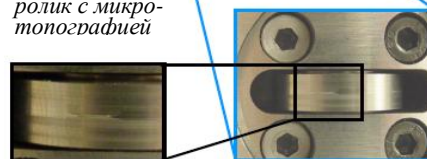
Согласно пунктам исследования, были проведены теоретические изыскания и разработана методика экспериментов, в частности, проведен анализ взаимодействия крутильно колеблющегося с УЗ частотой режущего клина и обрабатываемой поверхности при проведении операции растачивания. Рассмотрим пример расчета рабочих углов режущего клина с учетом расположения вершины клина относительно оси заготовки, скорости и подачи резания.



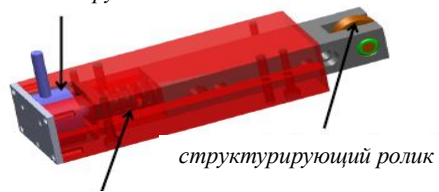
микроформирование на основе приработки



ролик с микро-топографией

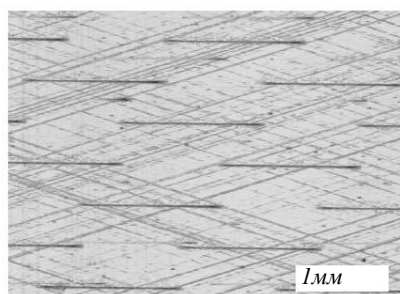


ячейка загрузки



механическая пружина

структурирующий ролик



1мм

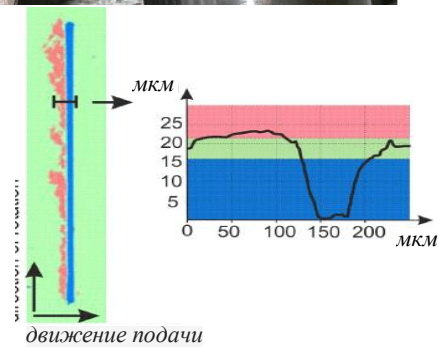


Рис. 3. Способ обкатки хонингованной поверхности роликом специального рельефа и полученные результаты новой технологии

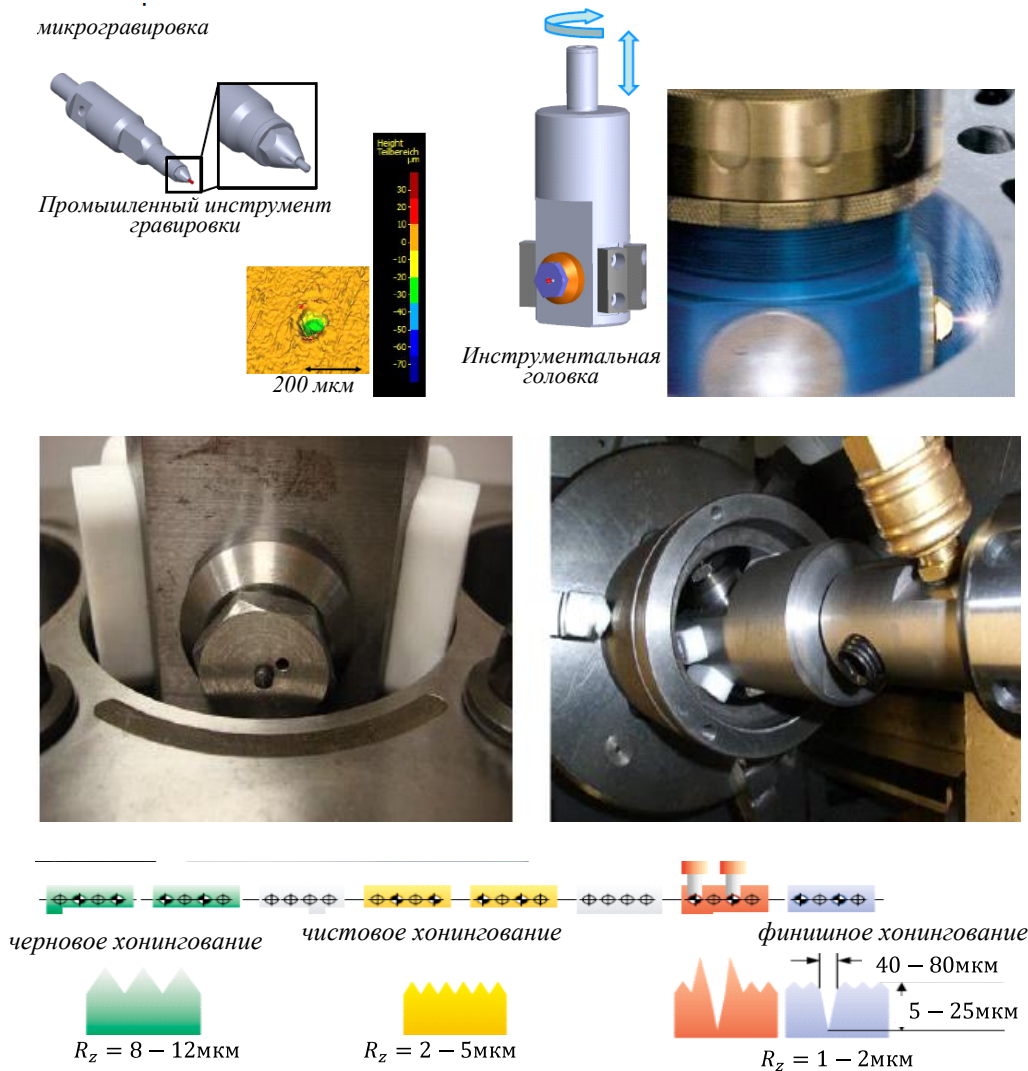


Рис. 4. Способ формирования специального рельефа использованием лазерных технологий

Примем, что режущий клин, имеющий углы  $\gamma_c, \alpha_c, \lambda > 0$ , установлен выше оси растачиваемого отверстия на величину  $h_y$ , т.е. ось крутильных колебаний  $O_1$  выше оси детали  $O$  на величину  $e_z, e_y$  (рис. 5а). Тогда передний и задние углы будут отличаться от углов заточки. Воспользуемся принципами ортогонального проектирования [1] и определим угол корректировки  $\sigma_N$ . Заметим, что

величина  $\sigma_N$  не постоянна, так как истинная величина вектора  $\vec{V}$  состоит из трех составляющих:

- вектор скорости вращательного движения:

$$\vec{V}^b = 2\pi\rho n \text{ [мм/мин]}; \quad (1)$$

- вектор скорости подачи режущего клина:

$$\vec{V}^s = nS \text{ [мм/мин]}; \quad (2)$$

- вектор скорости УЗК режущего клина:

$$\vec{V}^k = \tau_a \omega \rho_k \cos \omega t / 60 \text{ [рад/мин]}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – радиус-вектор обрабатываемой поверхности [мм];  $\rho_k$  – радиус-вектор колебательного движения;  $n$  – число оборотов детали [об/мин];  $S$  – подача режущего клина;  $\tau_a, \omega$  – амплитуда и частота УЗК режущего клина [рад], [с<sup>-1</sup>].

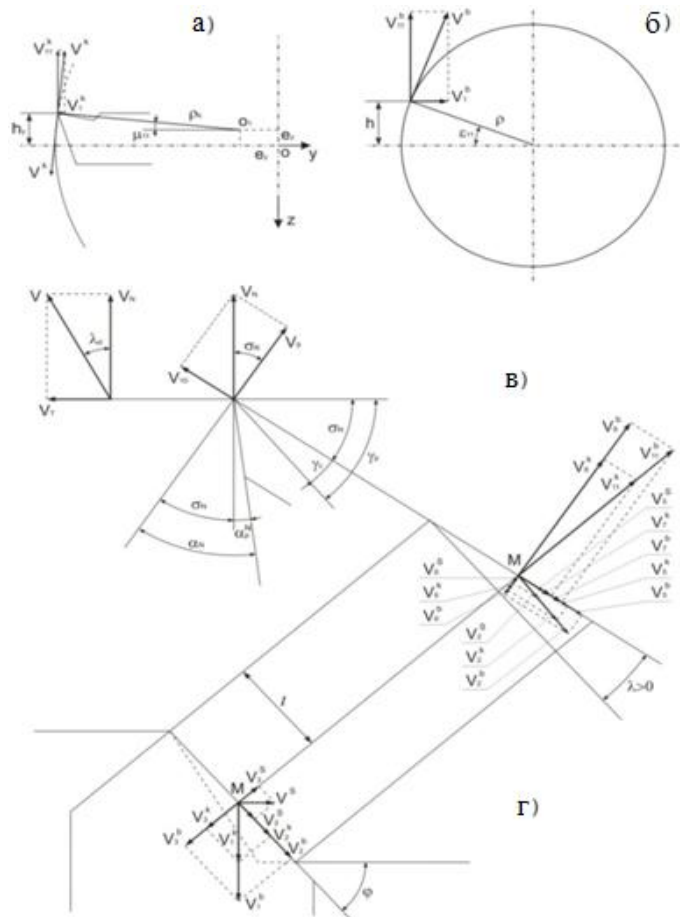


Рис. 5. План скоростей

Для облегчения восприятия и представления в планах скоростей не показаны линии построений и не учтены масштабы проекций скоростей, иначе схема усложнилась бы. Используя диапазоны изменения рабочих углов, имеем

$$\gamma_p = \gamma_c + \sigma_N; \quad \alpha_p^N = \alpha_c - \sigma_N; \quad tg\alpha_p = tg(\alpha_c - \sigma_N)\cos\lambda_p; \quad tg\lambda_p = V_T/V_N. \quad (4)$$

На основе рис. 5б, г и зависимостей (2.1) – (2.3) имеем

$$\varepsilon_{11} = \arcsin h/\rho = \arcsin(h_y + l \cdot \sin\lambda)/\rho, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_{11}^b &= V^b \cdot \cos\varepsilon_{11}, & V_5^b &= V_2^b \cdot \cos\lambda = V^b \cdot \sin\varepsilon_{11} \cdot \sin\varphi \cdot \cos\lambda, \\ V_1^b &= V^b \cdot \sin\varepsilon_{11}, & V_6^b &= V_2^b \cdot \sin\lambda = V^b \cdot \sin\varepsilon_{11} \cdot \sin\varphi \cdot \sin\lambda, \\ V_2^b &= V_1^b \sin\varphi = V^b \cdot \sin\varepsilon_{11} \cdot \sin\varphi, & V_7^b &= V_{11}^b \cdot \sin\lambda = V^b \cdot \cos\varepsilon_{11} \cdot \sin\lambda, \\ V_3^b &= V_1^b \cdot \cos\varphi = V^b \cdot \sin\varepsilon_{11} \cdot \cos\varphi, & V_8^b &= V_{11}^b \cdot \cos\lambda = V^b \cdot \cos\varepsilon_{11} \cdot \cos\lambda; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V_2^S &= V^S \cos\varphi, & V_5^S &= V_2^S \cos\lambda = V^S \cos\varphi \cdot \cos\lambda, \\ V_3^S &= V^S \sin\varphi, & V_6^S &= V_2^S \sin\lambda = V^S \cos\varphi \cdot \sin\lambda. \end{aligned} \quad (7)$$

Радиус-вектор колебательного движения  $\rho_k$ , угол отклонения от горизонтальной плоскости  $\mu_{11}$  и угол отклонения от УЗК  $\tau$  будут

$$\rho_k = (\rho \cdot \cos\varepsilon_{11} - e_y)/\cos\mu_{11}, \quad (8)$$

$$\mu_{11} = \arctg[(h - e_z)/(\rho \cdot \cos\varepsilon_{11} - e_y)], \quad (9)$$

$$tg\tau = a/\rho_k = A\sin\omega t/\rho_k \Rightarrow \tau = \arctg(A\sin\omega t/\rho_k). \quad (10)$$

Следовательно, имеем

$$\begin{aligned} V_{11}^k &= V^k \cos(\mu_{11} + \tau), & V_5^k &= V_2^k \cos\lambda = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \sin\varphi \cos\lambda, \\ V_1^k &= V^k \sin(\mu_{11} + \tau), & V_6^k &= V_2^k \sin\lambda = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \sin\varphi \sin\lambda, \\ V_2^k &= V_1^k \sin\varphi = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \sin\varphi, & V_7^k &= V_{11}^k \sin\lambda = V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \sin\lambda, \\ V_3^k &= V_1^k \cos\varphi = V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cos\varphi, & V_8^k &= V_{11}^k \cos\lambda = V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \cos\lambda; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_9 &= V_8^b + V_8^k + V_6^k - V_6^b - V_6^S, & V_N &= V_{10}/\sin\sigma_N, \\ V_{10} &= V_3^S - V_3^k - V_3^b, & V_T &= V_5^b + V_5^S + V_7^b + V_5^k + V_7^k. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя (1) – (3), (6), (7) и (11) в (12), получим

$$\begin{aligned}
 V_9 &= V^b \cos \varepsilon_{11} \cdot \cos \lambda + V^k \cdot \cos(\mu_{11} + \tau) \cdot \cos \lambda - V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda - \\
 &- V^S \cos \varphi \cdot \sin \lambda - V^b \sin \varepsilon_{11} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda = \\
 &= [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \cos \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \cos \lambda - \\
 &- S \cdot n \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda - \\
 &- [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda,
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 V_{10} &= V^S \sin \varphi - V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cdot \cos \varphi - V^b \sin \varepsilon_{11} \cdot \cos \varphi = \\
 &= S \cdot n \cdot \sin \varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi.
 \end{aligned} \tag{14}$$

Угол  $\sigma_N$  определим из условия  $ctg \sigma_N = V_9/V_{10}$ , которое равно

$$\begin{aligned}
 &\frac{[2\pi \rho n \cdot \cos \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \cos \lambda}{S \cdot n \cdot \sin \varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi} - \\
 &- \frac{S n \cos \varphi \cdot \sin \lambda + [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \sin \varphi \cdot \sin \lambda}{S n \sin \varphi - [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi},
 \end{aligned}$$

$$V_N = \{S n \sin \varphi - [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi\} / \sin \sigma_N,$$

$$\begin{aligned}
 V_T &= V^b \sin \varepsilon_{11} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \lambda + V^S \cos \varphi \cdot \cos \lambda + V^b \cos \varepsilon_{11} \cdot \sin \lambda + \\
 &+ V^k \sin(\mu_{11} + \tau) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \lambda + V^k \cos(\mu_{11} + \tau) \cdot \sin \lambda = \\
 &= [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \sin \varphi \cdot \cos \lambda + \\
 &+ S \cdot n \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda + \\
 &+ [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \cos \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \sin \lambda.
 \end{aligned}$$

На основе этих зависимостей преобразуем (4), тогда

$$\begin{aligned}
 tg \lambda_p &= \frac{\{S n \cos \varphi + [2\pi \rho n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \omega \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60]\} \cos \lambda \cdot \sin \sigma_N}{S \cdot n \cdot \sin \varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi} + \\
 &+ \frac{[2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \cos \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \cos(\mu_{11} + \tau)/60] \cdot \sin \lambda \cdot \sin \sigma_N}{S \cdot n \cdot \sin \varphi - [2\pi \cdot \rho \cdot n \cdot \sin \varepsilon_{11} + \tau_a \cdot \omega \cdot \rho_k \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\mu_{11} + \tau)/60] \cos \varphi}.
 \end{aligned}$$

Однако приведенная на рис. 5 схема не столь привлекательна, так как последняя зависимость с учетом того, что отношение  $V^S/V^b$  для исследуемого диапазона режимов резания должно быть определенной величиной, то  $\sigma_N$  уменьшит передний угол и увеличит задний угол режущего клина. С другой

стороны, из зависимости видно, что с уменьшением  $n, h_y, \rho$  и  $\varepsilon$  снизится величина  $\varepsilon_{11}$  и, следовательно,  $\sin \varepsilon_{11}$ . Это приведет к тому, что вышеотмеченный отрицательный эффект  $\sigma_N$  снизится и при определенных значениях  $n, h_y, \rho$  и  $\varepsilon$  станет или незначительным, или приведет к положительному эффекту - увеличению переднего угла режущего клина. Такого эффекта, возможно, трудно будет достигнуть исходя из конструктивных соображений. Для лучшего представления возможного варианта были рассмотрены случаи, когда ось колебательных движений находится в оставшихся трех четвертях сечения (рис. 6).

Проведем анализ всех возможных вариантов, в том числе растачивание с направленными по оси детали УЗК, растачивание с радиально направленными УЗК, растачивание с радиально направленными и крутильными УЗК.

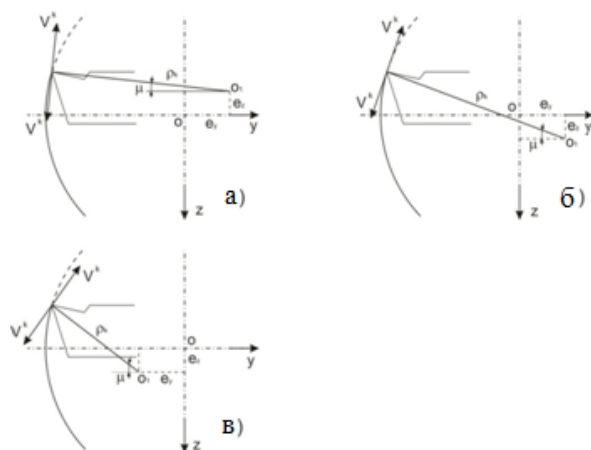


Рис. 6. Схемы, когда оси движений от УЗК находятся в других трех четвертях поперечного сечения детали

Опуская математическое описание и основываясь на кинематике взаимодействия клина и материала, при наложении на процесс УЗК можно сделать следующие выводы:

- с позиций увеличения угла  $\gamma_p$ , для режущего клина с положительным углом  $\lambda$ , при прочих равных условиях, целесообразно применить схему на рис. 6а, а для режущего клина с отрицательным углом  $\lambda$  – иную схему;
- с этих же позиций установление резца ниже оси вращения детали целесообразнее, чем установление вышеотмеченной оси;
- изменение рабочих углов режущих клиньев, в сравнении с углами их заточки, ограничено не только конструктивными соображениями, но и

обеспечением условия отсутствия затирания по фаске износа его задней грани;

- при возбуждении крутильных УЗК вектор скорости УЗК меняется и по величине, и по направлению, отклоняясь от тангенциального направления на угол  $\tau$ .

Перечисленные выводы подтверждают рост эффективности процесса растачивания, повышение показателей качества поверхности, улучшение динамических показателей процесса резания при наложении на процесс резания крутильных колебаний.

В случае наложения на процесс растачивания осевых УЗК сделаны выводы:

- в отличие от крутильных колебаний режущего клина при осевых его УЗК вектор колебательных движений всегда параллелен оси обрабатываемой поверхности, при этом отсутствует переменная прижимающая сила, и изменению подвергаются только две составляющие коэффициента трения;
- для режущего клина и при положительном, и при отрицательном углах наклона лезвия клина  $\lambda$ , с позиций увеличения угла  $\sigma_N$ , относительно оси вращения детали установка режущего клина ниже, чем при прочих равных условиях предпочтительнее, чем установка его выше оси вращения или на оси вращения;
- при осевых УЗК влияние вибраций на изменение рабочих углов режущего клина проявляется проще, чем при наложении крутильных УЗК;
- при переходе от крутильных УЗК к осевым проблема затирания задней грани с обработанной поверхностью не изменяется.

В случае наложения на процесс растачивания крутильно-осевых УЗК сделаны следующие выводы:

- вектор скорости УЗК переменен в данной точке режущего лезвия клина по направлению и по величине, и эти изменения имеют место в трехмерном пространстве. В случае отсутствия осевой составляющей пространственные изменения происходят в плоскости, перпендикулярной плоскости вращательной составляющей УЗК. В случае отсутствия крутильной составляющей пространственные изменения одинаково направлены в направлении осевых УЗК;
- расположение режущего клина, с позиций увеличения угла  $\gamma$ , предпочтительнее ниже оси вращения детали;
- в зависимости от величин векторов скорости крутильного движения и скорости главного движения резания возможны условия, когда передняя грань режущего клина будет отрываться от корня стружки, что, с одной стороны, безусловно, положительно, так как улучшаются условия проникновения смазочно-охлаждающей среды в зоны контактов режущего клина; с другой стороны – непрерывный процесс резания преобразуется в



прерывистый, что будет воздействовать на сам процесс резания отрицательно. Отметим, что при правильной оценке скоростей можно будет обеспечить такие условия, чтобы отрыв режущего клина от стружки происходил при условиях, когда последующий удар при врезании был по возможности мягким и безболезненным, но достаточным, чтобы возникающее при этом реальное снижение давления способствовало всасыванию смазывающей среды в зону последующего контакта.

Были проведены экспериментальные исследования по выявлению степени воздействия УЗК на формирование рельефа обработанной поверхности при наружном точении гаммы материалов: стали марки сталь 45, ШХ15, 12Х19Н9Т; титановые сплавы ВТ5, ВТ10, ОТ-4; латунь ЛС59 и бронза БРАЖ. На рис. 7 приведены микрофотографии обработанных поверхностей для стали сталь 45.

Отметим, что рельеф различной конфигурации можно получить УЗ резанием, но этот же рельеф необходимо в дальнейшем обработать так, чтобы полученная поверхность имела бы достаточную несущую способность с позиций трения, что и было осуществлено технологией прецизионного шлифования и суперфиниша. Полученные поверхности (рис. 8) в определенной мере удовлетворяли предъявляемым к ним требованиям, но ввиду того, что на отмеченные технологии необходим определенный допуск на обработку, то пригодными оказывались лишь поверхности, полученные с применением высоких амплитуд УЗК выше 6...8 мкм. Причем ввиду вынужденной переустановки изделия на процесс суперфиниша после токарной обработки наблюдалось изменение симметрии образованных трибологических дорожек.

Такое положение дел привело к необходимости испытать возможность обкатывания цилиндрическим или бочкообразным роликом обработанных резанием поверхностей (рис. 9). Здесь результаты оказались предпочтительнее, однако сам процесс обкатывания длинномерных деталей непроизводителен, что с позиций массового производства ДВС малопримемлемо.

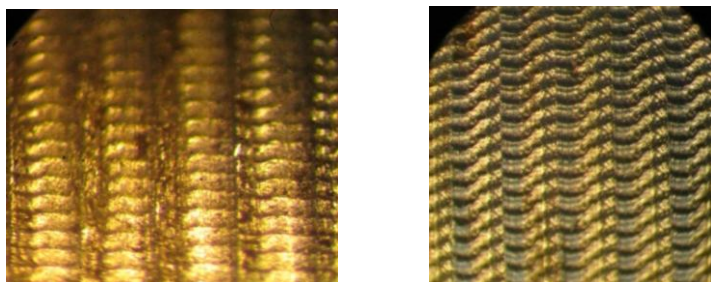
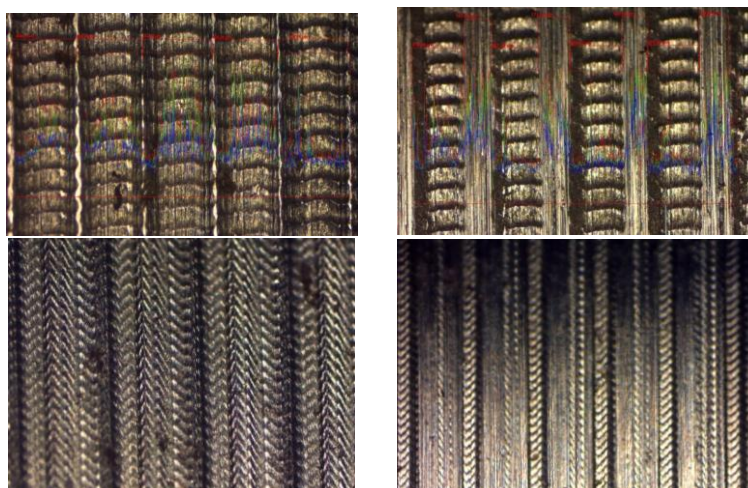


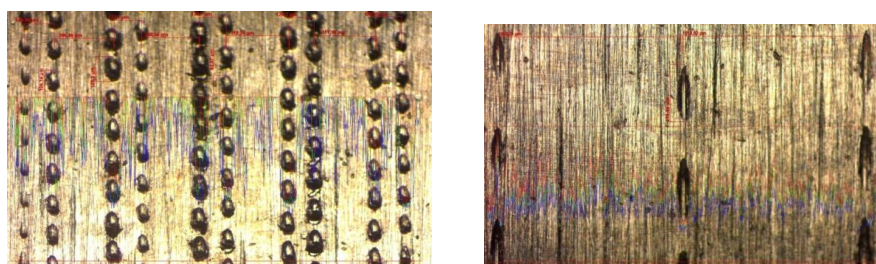
Рис. 7. Обработываемый материал – сталь 45, частота УЗК  $f = 22$  кГц



*Рис. 8. Обработанные методом УЗ резания поверхности (слева) и те же поверхности после тонкого шлифования и хонингования*



*Рис. 9. Образцы после силовой обработки методом радиального УЗ резания (слева) и после обкатки цилиндрическим роликом (справа)*



*Рис. 10. Образец с двойной дорожкой со смещением, скорость резания средняя (слева); одинарная дорожка, высокая скорость резания.  $A=A/2$  (справа)*

**Выводы.** Разработан новый метод формирования трибологических структур на поверхностях пары трения использованием УЗК с повышенными показателями по смазывающим свойствам, что, в свою очередь, может привести к повышению долговечности и работоспособности пары трения и, более того, позволит создать резерв, допускающий повысить степень точности посадки в паре трения, следовательно, улучшить технические характеристики современной техники. Нужны дальнейшие исследования на предмет выявления как оптимальных рельефов, так и технологического обеспечения процесса формирования специальной трибологии поверхности.

Полученные в данном исследовании и ранее [2-5] результаты допускают необходимость поиска иных технологических решений с применением УЗК, но уже не мощного УЗК, как для силового резания и многих техпроцессов, а “тонкого” УЗК с хорошей амплитудой и малыми энергетическими затратами. Такая попытка в исследованиях была осуществлена. На рис. 10 показана поверхность, подвергнутая УЗ резанию после процесса хонингования, т.е. налицо перспективы для разработки новой технологии формирования трибологических структур на поверхностях трения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Христафорян С.Ш.** Теоретические и технологические основы повышения эффективности обработки материалов использованием УЗК: Автореф. дис. ... д.т.н. / ГИУА. – Ереван, 1996. – 36 с.
2. Изменение условий контактного трения при наложении ультразвуковых колебаний на процесс резания / **С.Ш. Христафорян, А.В. Артунян, Г. Пипер и др.** // Вестник ГИУА. Серия “Механика, машиноведение, машиностроение”. – 2013. – Вып. 16, № 1. – С. 81-90.
3. Предпосылки изменения явлений на передней грани режущего клина от наложения УЗК на резец / **С.Ш. Христафорян, Г-Ю. Пиппер, Ф. Велцел и др.** // Сб. тр. XXI МНТК “Машиностроение и техносфера XXI века”. – Донецк, 2012. – Т. 3. – С. 43-47.
4. **Христафорян С.Ш.** Физическая модель пластического деформирования материала в процессах резания // Научно-технические технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – № 6. – С. 18- 24.
5. **Христафорян С.Ш., Назарян Э.А., Баласанян Б.С.** Анализ напряженного состояния контакта по передней грани режущего клина при резании пластичных материалов // Вестник ГИУА. Серия “Механика, машиноведение машиностроение”. – 2012. – Вып. 15, № 1. – С. 24-34.

*Поступила в редакцию 10.01.2014.  
Принята к опубликованию 19.05.2014.*

**ՇՓՄԱՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹՆԵՐԻ ՎՐԱ ՇՓԱՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ  
ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ՀԱՏՈՒԿ ՏԵԽՆՈԼՈԳԻԱՆԵՐ**

**Ս.Շ. Խրիստաֆորյան, Է.Ս. Քրիստաֆորյան, Ա.Լ. Արշակյան**

Դիտարկվում են մշակման տեխնոլոգիայի տեսական և տեխնոլոգիական առանձնահատկությունները, որոնք հնարավորություն են տալիս արտադրելու շփման զույգեր՝ շփագիտական հատկությունների բարձրացված բնութագրերով, մասնավորապես, հպման գոտի յուղոլ նյութերի թափանցման պայմանների լավացման հնարավորությունները՝ առանց շփման զույգի մակերևույթների ճշտության և որակի բնութագրերի վատացման:

**Առանցքային բառեր.** գերծայն, սայրային կտրում, շրջագլորում, մակերևույթի ռելիեֆ:

**SPECIAL TECHNOLOGIES FOR FORMING TRIBOTECHNICAL STRUCTURES  
ON FRICTION SURFACES**

**S.Sh. Khristaforyan, E.S. Khristaforyan, A.L. Arshakian**

The theoretical and technological aspects of developing a technology allowing to produce a friction pair surfaces with higher rates of tribological characteristics, in particular, the possibility of improving the penetration of contact lubricants without compromising the accuracy characteristics and the surface quality of the friction pair parts are considered.

**Keywords:** ultrasound, blade cutting, running, surface relief.

## УТОЧНЕННЫЙ МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЭМУЛЬГИРОВАНИЯ МАСЛА В ВОДЕ

Б.С. Баласанян<sup>1</sup>, А.Д. Маляренко<sup>2</sup>, А.Б. Баласанян<sup>1</sup>, Х.Н. Акопян<sup>1</sup>

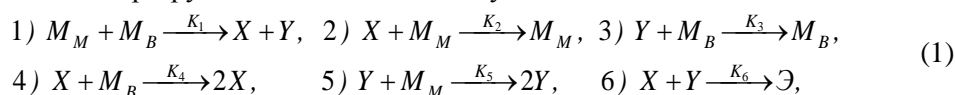
<sup>1</sup>Государственный инженерный университет Армении (Политехник)

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Предлагается уточненный механизм процесса ультразвукового эмульгирования масла в воде. Установлено, что в системе имеет место колебательный режим по концентрациям промежуточных продуктов  $X$  и  $Y$ , что подтверждается наличием аттрактора.

**Ключевые слова:** эмульгирование, ультразвук, кинетика, процесс, конкурентная реакция, производство, разрушение, аттрактор.

**Введение.** Согласно известному механизму описания стадий протекания процесса ультразвукового эмульгирования масел в воде [1-3], в начале процесса под действием ультразвуковых колебаний (УЗК) из масс масла и воды образуются более мелкие частицы  $X$  и  $Y$  соответственно масла и воды. Затем одновременно происходит перемещение ранее образованных частиц  $X$  масла в оставшуюся водную среду с образованием в этой среде эмульсии, а также перемещение образованных частиц  $Y$  воды в оставшуюся масляную среду с образованием в этой среде эмульсии. Часть частиц  $X$  масла переходит в масляную среду, сливаясь с маслом, т.е. за счет них увеличивается ранее уменьшенная масса масла. Аналогично, образованные частицы  $Y$  воды переходят в водную среду, сливаясь с ней, вследствие чего за счет поступивших частиц воды увеличивается ранее уменьшенная ее масса. И, наконец, соединение частиц  $X$  масла с частицами  $Y$  воды сопровождается образованием нового вещества – эмульсии. На основе этой схемы процесса ультразвукового эмульгирования получена конкурентная реакция [1, 2], описывающая стадии производства и разрушения компонентов эмульсии в виде



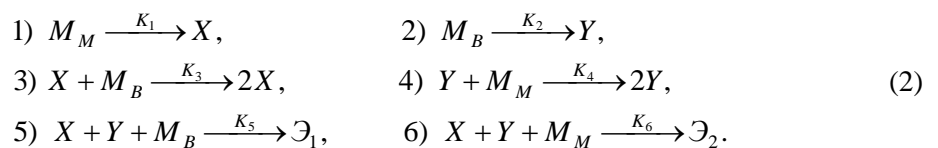
где  $M_M$  - первоначальная объемная концентрация масла в реакторе;  $M_B$  - первоначальная объемная концентрация воды в реакторе;  $\mathcal{E}$  - объемная концентрация эмульсии в реакторе;  $X$  - концентрация образованных отдельных

частиц масла в реакторе;  $Y$  - концентрация образованных отдельных частиц воды в реакторе эмульгатора;  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$  - коэффициенты, характеризующие интенсивность протекания соответствующих стадий процесса.

Недостатком известной схемы описания процесса ультразвукового эмульгирования является то, что образование частиц  $X$  и  $Y$  под действием УЗК происходит с одинаковой интенсивностью  $K_1$ , что не соответствует реальному процессу ультразвукового эмульгирования. Из шестой стадии не видно, в какой среде она образуется.

Целью настоящего исследования является попытка уточнения механизма процесса ультразвукового эмульгирования.

**Методы исследования.** В механизме процесса ультразвукового эмульгирования [4] в качестве стадий протекания процесса предлагается следующий сценарий. Под действием УЗК из массы масла образуются его более мелкие частицы  $X$  с интенсивностью  $K_1$ , а из массы воды – ее более мелкие частицы  $Y$  с интенсивностью  $K_2$ . С целью упрощения записи конкурентной реакции принято, что образованные частицы  $X$  полностью переходят в водную среду, а частицы  $Y$  – в масляную среду. Это позволяет исключить из конкурентной реакции (1) вторую и третью стадии, что не может оказать влияние на конечные результаты, так как в нашем случае эти стадии учитываются коэффициентами  $K_1$  и  $K_2$ . Под действием УЗК частицы  $Y$  в среде масла дробятся с образованием двух более мелких частиц  $2Y$ , а частицы  $X$  в среде воды дробятся с образованием двух более мелких частиц  $2X$ . Частицы  $X$  и  $Y$  в водной среде образуют эмульсию  $\mathcal{E}_1$  первого вида, а в среде масла – эмульсию  $\mathcal{E}_2$  второго вида. Таким образом, конкурентную реакцию, описывающую стадии производства и разрушения составляющих компонентов эмульсии, можно представить в виде



Из (1) можно получить кинетические уравнения для  $X$  и  $Y$  в виде

$$\frac{dX}{dt} = K_1 M_M + K_3 M_B X - (K_5 M_B + K_6 M_M) XY, \quad (3)$$

$$\frac{dY}{dt} = K_2 M_B + K_4 M_M Y - (K_5 M_B + K_6 M_M) XY. \quad (4)$$

В квазистационарном режиме имеем

$$\begin{cases} K_1 M_M + K_3 M_B X_q - (K_5 M_B + K_6 M_M) X_q Y_q = 0, \\ K_2 M_B + K_4 M_M Y_q - (K_5 M_B + K_6 M_M) X_q Y_q = 0, \end{cases} \quad (5)$$

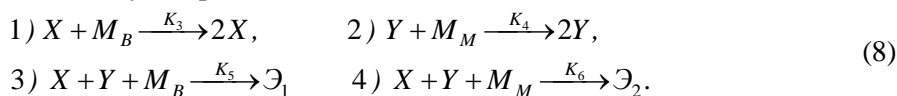
откуда получены следующие решения:

$$Y_q = \frac{K_3 K_4 M_M M_B - (K_5 M_B + K_6 M_M)(K_2 M_B - K_1 M_M)}{2 K_4 M_M (K_5 M_B + K_6 M_M)} \times \left( 1 \pm \sqrt{1 + \frac{4 K_2 K_3 K_4 M_M M_B^2 (K_5 M_B + K_6 M_M)}{K_4 K_3 M_M M_B - (K_5 M_B + K_6 M_M)(K_2 M_B - K_1 M_M)}} \right), \quad (6)$$

$$X_q = \frac{K_3 K_4 M_M M_B - (K_5 M_B + K_6 M_M)(K_1 M_M - K_2 M_B)}{2 K_3 M_B (K_5 M_B + K_6 M_M)} \times \left( 1 \pm \sqrt{1 + \frac{4 K_1 K_3 M_B K_4 M_M^2 (K_5 M_B + K_6 M_M)}{(K_3 K_4 M_M M_B - (K_5 M_B + K_6 M_M)(K_1 M_M - K_2 M_B))}} \right). \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) подтверждают результат известных исследований [1,2], заключающийся в том, что в процессе ультразвукового эмульгирования имеют место два явно устойчивых квазистационарных состояния, при которых могут быть получены два вида эмульсий (первая - в среде масла, вторая - в среде воды). К сожалению, они довольно громоздки, и наши попытки установления колебательности или асимптотической устойчивости процесса ультразвукового эмульгирования не увенчались успехом. Выходом из создавшегося положения является переход к упрощенной модели процесса ультразвукового эмульгирования, которая, как известно [5], передает основные черты сложных колебательных процессов.

Применительно к кинетике превращения  $M_M + M_B \rightarrow \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$  может иметь место колебательный режим по концентрациям промежуточных продуктов  $X$  и  $Y$ , если механизм эмульгирования включает автокаталитические стадии:



Как видно, в механизме (8) автокаталитическими являются две первые реакции. Кроме того, в схему не включены стадии появления  $X$  и  $Y$ , поскольку, согласно известным рекомендациям [5], это привело бы лишь к излишней детализации, не влияя на механизм возникновения осцилляций.

Запишем кинетические уравнения для частиц  $X$  и  $Y$ :

$$\frac{dX}{dt} = K_3 M_B X - (K_5 M_B + K_6 M_M) XY, \quad (9)$$

$$\frac{dY}{dt} = K_4 M_M Y - (K_5 M_B + K_6 M_M) XY. \quad (10)$$

Разделив первое кинетическое уравнение (9) на (10), а также отделив переменные, получим

$$\left( \frac{K_4 M_M}{X} - (K_5 M_B + K_6 M_M) \right) dX = \left( \frac{K_3 M_B}{Y} - (K_5 M_B + K_6 M_M) \right) dY. \quad (11)$$

Интегрирование дифференциального уравнения (11) возможно, если концентрации масла и воды в реакторе изменяются незначительно, то есть  $M_B = \text{const}$ ,  $M_M = \text{const}$ . Таких условий можно добиться осуществлением процесса эмульгирования в открытой системе, если добавлять  $M_B$  и  $M_M$  и с соответствующей скоростью выводить из реактора образованные продукты  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ . В этом случае интегрированием (11) можно получить

$$K_4 M_M \ln X - (K_5 M_B + K_6 M_M) X = K_3 M_B \ln Y - (K_5 M_B + K_6 M_M) Y + K, \quad (12)$$

где  $K$  – постоянная интегрирования.

Потенцируя (12), найдем

$$X^{K_4 M_M} \cdot e^{-(K_5 M_B + K_6 M_M) X} = Y^{K_3 M_B} \cdot e^{-(K_5 M_B + K_6 M_M) Y} \cdot C, \text{ где } C = \exp K.$$

Это уравнение определяет в неявном виде на плоскости  $X$ – $Y$  семейство интегральных кривых и не имеет точного решения. Для этого использованы численные методы решения дифференциальных уравнений (9) и (10) с применением программы Lorenz Attraktor. Vi, разработанной в National Instruments в среде LabVIEW, посредством которых для различных значений коэффициентов, входящих в (9) и (10), построены интегральные кривые и зависимости изменения концентраций частиц  $X$  и  $Y$  в течение времени (рис. 1) [4]. Анализ полученных результатов показал [4], что процесс эмульгирования применением УЗК не имеет колебательного режима по концентрациям промежуточных продуктов  $X$  и  $Y$ , что подтверждается отсутствием аттрактора (любой геометрический образ: точка, замкнутая кривая и т.д., к которому сходятся все траектории, был назван Пригожиным аттрактором [6]), так как в системе нет одной общей траектории, единой для всех начальных условий и достижимой даже спустя продолжительное время. С другой стороны, траектории являются устойчивыми, так как с течением времени во всех случаях (рис. 1) в зависимости от значений коэффициентов, входящих в (9) и (10), концентрации частиц  $X$  и  $Y$  в процессе ультразвукового эмульгирования, изменяясь в начале, в конце доходят до своего максимального или минимального устойчивого состояний.



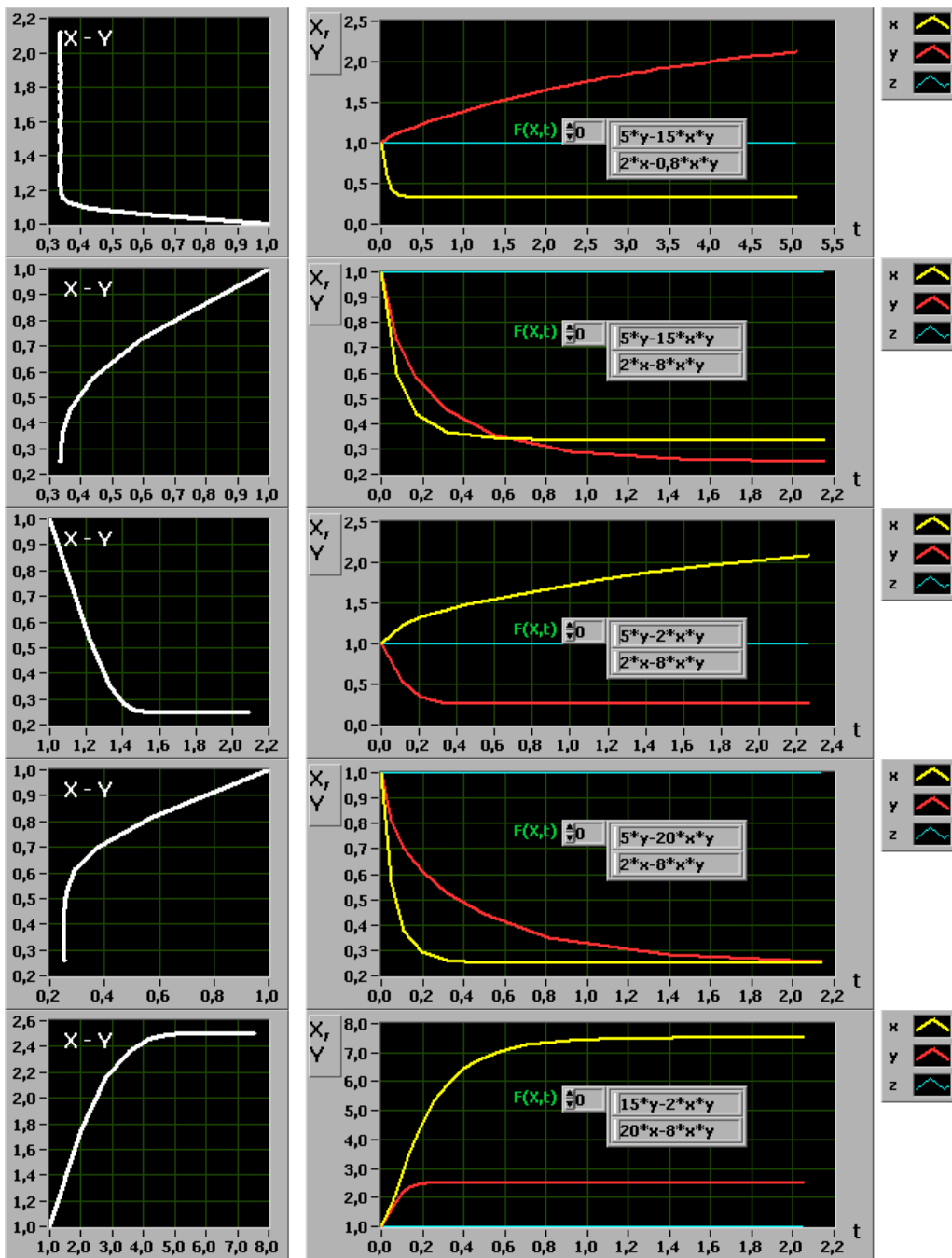
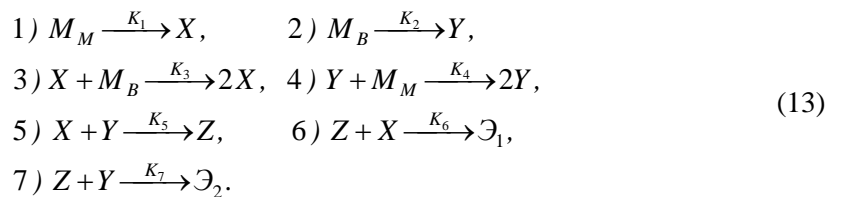


Рис. 1. Интегральные кривые и зависимости изменения концентраций частиц  $X$  и  $Y$  в течение времени от различных значений коэффициентов, указанных в соответствующих контроллерах [4]

**Уточнение механизма процесса ультразвукового эмульгирования.** Как было отмечено ранее, в схему процесса ультразвукового эмульгирования не включены стадии появления  $X$  и  $Y$ , так как согласно известным рекомендациям [5], это приводит к излишней детализации, не влияя на механизм возникновения осцилляций. Для проверки этих предположений проведены дополнительные теоретические исследования, где в качестве стадий протекания процесса ультразвукового эмульгирования масел в воде предлагается следующий уточненный сценарий.

Под действием УЗК из массы масла образуются его более мелкие частицы  $X$  с интенсивностью  $K_1$ , а из массы воды – ее более мелкие частицы  $Y$  с интенсивностью  $K_2$ . С целью упрощения записи конкурентной реакции примем, что образованные частицы  $X$  полностью переходят в водную среду, а частицы  $Y$  – в масляную среду. Это позволяет исключить из конкурентной реакции (1) вторую и третью стадии, что не может оказать влияние на конечные результаты, так как в нашем случае эти стадии учитываются коэффициентами  $K_1$  и  $K_2$ . Под действием УЗК частицы  $Y$  в среде масла дробятся с образованием двух более мелких частиц  $2Y$ , а частицы  $X$  в среде воды дробятся с образованием двух более мелких частиц  $2X$ . Частицы  $X$  и  $Y$  образуют эмульсию  $Z$  с интенсивностью  $K_5$ . Учитывая, что в процессе эмульгирования образуются два вида эмульсий [1, 2], эмульсия  $Z$  в водной среде образует эмульсию  $\mathcal{E}_1$  первого вида с интенсивностью  $K_6$ , а в среде масла – эмульсию  $\mathcal{E}_2$  второго вида с интенсивностью  $K_6$ . Таким образом, конкурентную реакцию, описывающую стадии производства и разрушения составляющих компонентов эмульсии, можно представить в виде



Из (13) можно получить кинетические уравнения для веществ  $X$  и  $Y$  в виде

$$\begin{cases}
 \frac{dX}{dt} = K_1 M_M + K_3 M_B X - K_5 XY - K_6 XZ, \\
 \frac{dY}{dt} = K_2 M_B + K_4 M_M Y - K_5 XY - K_7 YZ, \\
 \frac{dZ}{dt} = K_5 XY - K_6 XZ - K_7 YZ.
 \end{cases}
 \tag{14}$$

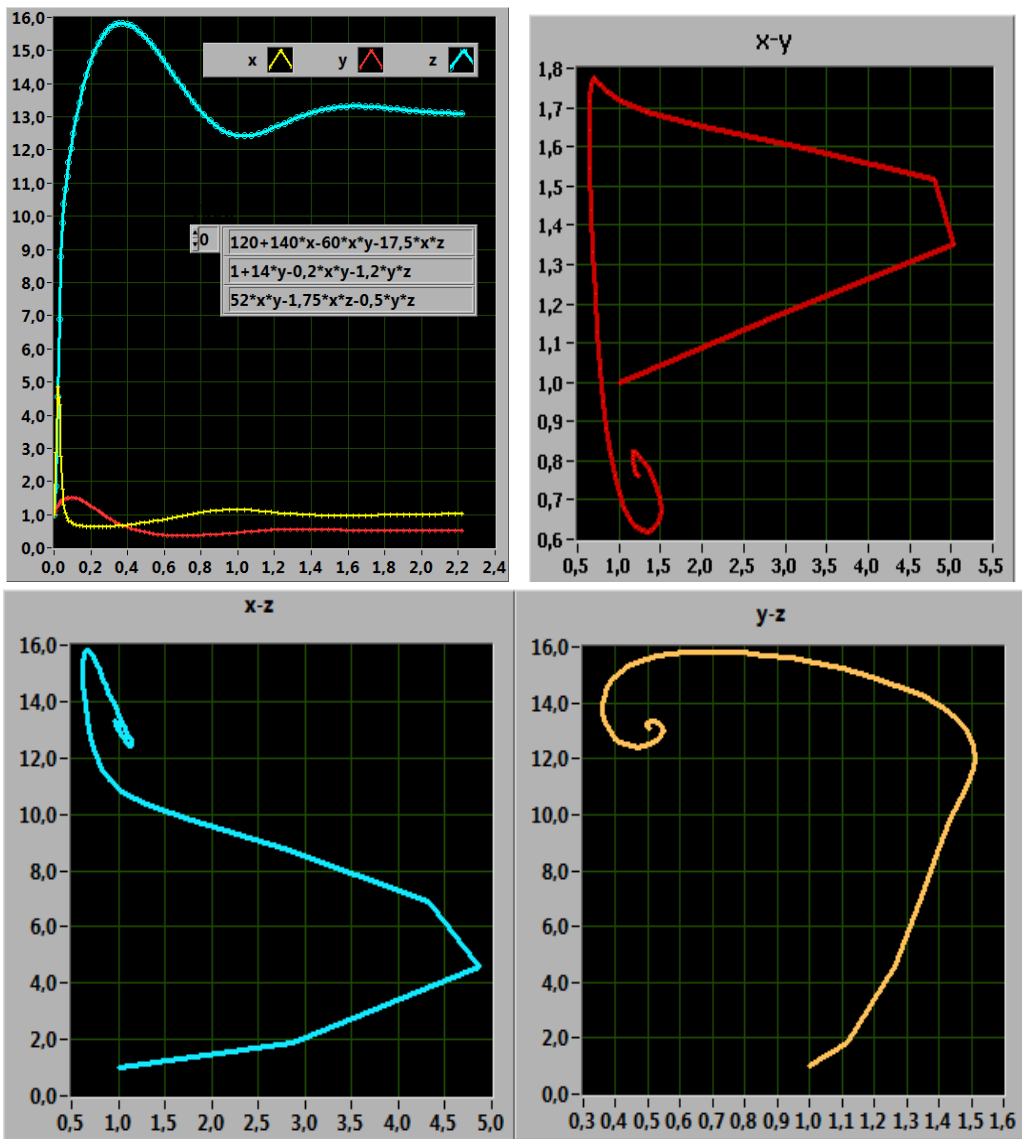


Рис. 2. Теоретическая зависимость интенсивности образования эмульсий в течение времени и аттракторы процесса ультразвукового эмульгирования

С применением программы Lorenz Attraktor. Vi, разработанной в National Instruments в среде LabVIEW, для различных значений коэффициентов, входящих в (14), построены интегральные кривые и зависимости изменения концентраций частиц X-Y-Z в течение времени, одна из которых приведена на рис. 2. Как видно из рисунка, при определенных значениях коэффициентов, входящих в

кинетическое уравнение (14), система имеет колебательный режим по концентрациям промежуточных продуктов  $X$  и  $Y$ , что подтверждается наличием аттрактора и отсутствием предельного цикла, так как в системе нет одной общей траектории, единой для всех начальных условий и достижимой даже спустя продолжительное время.

**Заключение.** Предложен уточненный механизм процесса ультразвукового эмульгирования масел в воде. Установлено, что применение стадий появления промежуточных продуктов  $X$  и  $Y$  в кинетике процесса ультразвукового эмульгирования масел в воде позволяет получить теоретические зависимости интенсивности образования эмульсий в течение времени, достаточно хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Выявлено, что при определенных условиях осуществления процесса ультразвукового эмульгирования в системе имеет место колебательный режим по концентрациям промежуточных продуктов  $X$  и  $Y$ , что подтверждается наличием аттрактора.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке ГКН МОН РА в рамках научного проекта № SCS 13-2D219.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христафорян С.Ш., Баласанян А.Б., Григорян Г.Р. Анализ особенностей образования эмульсий с позиции самоорганизации структур // Вестник Инженерной академии Армении. – 2005. – Т. 2, № 4. – С. 544-548.
2. Баласанян А.Б. Повышение эффективности процесса эмульгирования наложением колебательных полей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ереван, 2006. – 22 с.
3. Баласанян А.Б. Некоторые особенности процесса ультразвукового эмульгирования // Вестник Инженерной академии Армении. – 2006. – Т. 3, № 1. – С. 130-133.
4. Акопян Х.Н. О кинетике процесса ультразвукового эмульгирования // Вестник ГИУА (Политехник). Серия “Механика, машиноведение, машиностроение”. – 2013. – Вып. 16, № 1. – С. 90-98.
5. Первухин О.К. Колебательные реакции: Методическое пособие. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1999. – 94 с.
6. Пригожин И. От существующего к возникающему. – М.: Наука. 1985. – 327 с.

*Поступила в редакцию 25.12.2013.  
Принята к опубликованию 19.05.2014.*

**ՋՐՈՒՄ ՅՈՒՂԻ ԳԵՐՁԱՅՆԱՅԻՆ ԷՄՈՒԼԳԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՃԳՐՏԿԱԾ  
ՄԵԽԱՆԻԶՄ**

**Բ.Ս. Բալասանյան, Ա.Դ. Մալյարենկո, Ա.Բ. Բալասանյան, Խ.Ն. Հակոբյան**

Առաջարկվում է ջրում յուղի գերձայնային էմուլգացման գործընթացի ճգրտված մեխանիզմ: Հաստատված է, որ որոշակի պայմաններում, ըստ  $X$  և  $Y$  միջանկյալ արտադրանքի կոնցենտրացիաների, համակարգում առաջանում է տատանողական ռեժիմ, ինչը հաստատվում է ատրակտորի առկայությամբ:

**Առանցքային բառեր.** էմուլգացում, գերձայն, կինետիկա, գործընթաց, մրցակցային ռեակցիա, արտադրություն, քայքայում, ատրակտոր:

**A REFINED MECHANISM FOR THE PROCESS OF ULTRASONIC  
EMULSIFICATION OF OIL IN WATER**

**B.S. Balasanyan, A.D. Malyarenko, A.B. Balasanyan, Kh.N. Hakobyan**

A refined mechanism of the oil ultrasonic emulsification process in water is proposed. It is established that there is an oscillatory mode on concentrations of intermediate products  $X$  and  $Y$  confirmed by the presence of an attractor.

**Keywords:** emulsification, ultrasound, kinetics, process, competitive reaction, production, destruction, attractor.

## ВЛИЯНИЕ ГАЗОВЫХ СРЕД НА ПРОЦЕСС ИЗНАШИВАНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Ф.А. Парикян, А.С. Бабаян

*Государственный инженерный университет Армении (Политехник)*

Представлены результаты исследования влияния газовых сред на процесс изнашивания режущего инструмента. Показана возможность реального и целенаправленного воздействия газовых сред на процесс резания и изнашивания инструмента. Эффективность действия кислородной среды во многом зависит как от условий резания, так и от химического состава обрабатываемого и инструментального материалов.

**Ключевые слова:** газовая среда, режимы резания, изнашивание инструмента.

**Введение.** Изучение закономерностей влияния среды на механические характеристики различных материалов, а также природы физико-химических явлений на межфазных границах диктует необходимость применения более эффективных методов управления процессами деформирования твёрдых тел при обработке резанием, а также формирования обработанных поверхностей с заранее заданными механическими свойствами. В процессе резания в результате физико-химического взаимодействия тонких поверхностных слоёв обрабатываемого и инструментального материалов с газовой средой происходят значительные изменения в контактных процессах, которые влияют как на динамику процесса и качество поверхности, так и на изнашивание рабочих граней инструмента [1,2].

Основные пути повышения стойкости инструмента сводятся к поиску новых, более прочных, теплостойких и износостойких инструментальных материалов, усовершенствованию конструкции и оптимизации геометрических параметров режущей части инструмента, назначению рациональных режимов резания, применению эффективных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и другим технологическим мерам.

Наряду с перечисленными методами следует выделить также сравнительно мало изученный метод управления стойкостью инструмента путём ввода в зону резания различных газов. Кроме того, исследование данного вопроса будет способствовать раскрытию роли газовой фазы при применении СОЖ [3].

**Методика исследования.** В процессе исследования была подвергнута обработке сталь 45 инструментом с механическим креплением пластин твердых сплавов Т15К6 и Т5К10 в интервале скоростей резания от 30 до 100 м/мин при постоянной подаче  $S = 0,1$  мм/об, глубине резания  $t = 0,5$  мм и неизменной геометрии режущей части пластин в среде кислорода и аргона. Полученные результаты были сравнены с данными при резании в воздухе.

**Результаты исследования.** В табл.1 представлены результаты влияния газовых сред на износ резца по задней грани при изменении скорости резания. Анализ данных показывает, что с повышением скорости резания  $h_z$  сначала снижается, а затем, достигнув минимума при некоторой оптимальной скорости резания, начинает возрастать. Показано также, что кислород является наиболее эффективной средой, где величина износа минимальна во всем исследуемом диапазоне скоростей резания, в то время как в воздухе и аргоне она значительно повышается.

*Таблица 1*

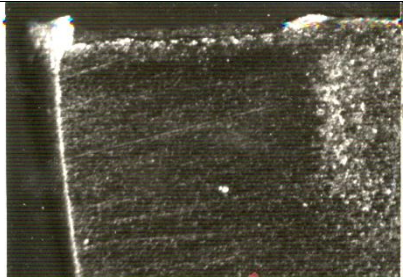
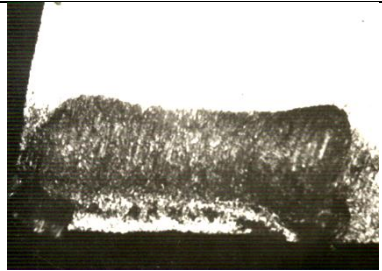
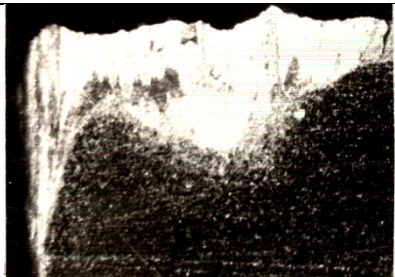

*Влияние газовых сред на износ по задней грани  $h_z$  резца из Т5К10 в мм при резании стали 45. Путь резания 500 м*

Среда	Скорость резания, м/мин			
	30	50	75	100
Кислород	0,1	0,05	0,065	0,11
Воздух	0,32	0,225	0,13	0,2
Аргон	0,67	0,41	0,26	0,3

В зоне скоростей наростообразования интенсивность изнашивания инструмента при переходе от кислородной среды к воздуху и аргону резко возрастает. При этом, как видно из рис.1, резко изменяется топография износа по передней и задней граням инструмента. Если в среде кислорода износ в основном происходит по передней грани в виде лунки, а на задней наблюдается узкая равномерная фаска износа, то уже в аргоне он происходит как на передней (в виде локальных вырывов отдельных частиц твердого сплава), так и по задней граням, где износ имеет более сложную конфигурацию. С увеличением скорости резания до 100 м/мин разница в величинах износа несколько снижается, хотя эффективность кислородной среды и здесь довольно ощутима.

Результаты экспериментов показали, что при резании стали 45 в газовых средах изменяется как величина износа по задней грани инструмента, так и физическая природа износа. Механизм изнашивания режущего инструмента в

газовых средах можно объяснить исходя из характера контактных процессов и условий стружкообразования. В процессе пластической деформации возникает значительная и неравновесная концентрация вакансий и дислоцированных атомов, которые образуются в результате движения дислокаций, что приводит к резкому возрастанию диффузионных процессов [4,5]. В этих условиях, в зависимости от газовой среды, развиваются окислительные или адгезионные процессы. Интенсивные пластические деформации и локальные высокие температуры, а также идеально чистые, химически чрезвычайно активные поверхности способствуют протеканию процессов, которые реализуются за счёт диффузии между контактными поверхностями и приводят к интенсивному развитию схватывания [6]. В среде аргона, адсорбция которого ничтожно мала, возникает в основном физическая адсорбированная пленка, которая обладает наименьшей эффективностью в смысле понижения адгезии, приближая тем самым условия контактирования к таковым в вакууме. В процессе резания это приводит к непрерывному возникновению и срезанию адгезионных связей, способствующих отрыву, срезу и удалению частиц твёрдого сплава, и вызывает интенсивный адгезионный износ инструмента.

	Сталь 20	Сталь 45
Кислород		
Аргон		

*Рис. 1. Износ по задней и передней поверхностям инструмента из T5K10 при резании стали 45 в различных газовых средах. Путь резания 500 м*



В среде воздуха, который занимает промежуточное положение между кислородом и аргоном, из-за недостаточного количества кислорода диффузионный поток не успевает создать сплошную плёнку твёрдого раствора, в результате чего на сравнительно больших площадках трения возникает взаимная диффузия металлических атомов и развиваются адгезионные процессы.

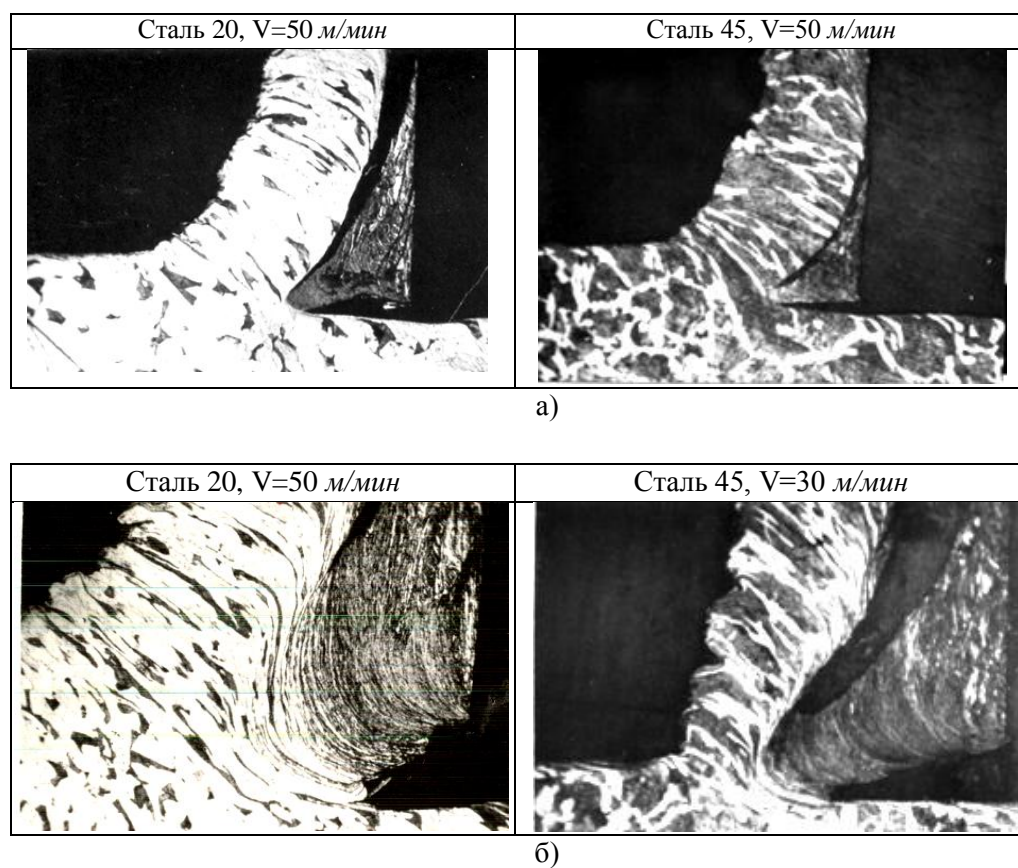
Из-за нестабильности контактных пластических деформаций возникает неустойчивый нарост, который периодически срывается, вызывая локальные микровыкрашивания твёрдого сплава как на передней, так и на задней поверхностях инструмента. Вышеуказанные явления в воздухе и особенно в аргоне развиваются в той или иной степени во всём исследованном диапазоне скоростей резания, и поэтому каких-либо качественных изменений в механизме изнашивания режущего инструмента не наблюдается.

Механизм изнашивания твёрдого сплава в кислороде имеет иную природу и зависит как от характера окисления этих сплавов, так и от изменений, которые вносит кислород в контактные условия при стружкообразовании. В кислороде, химическая активность которого чрезвычайно высока, в результате физико-химического воздействия с контактными поверхностями образуются тонкие плёнки окислов, которые способствуют подавлению сил молекулярного взаимодействия трущихся ювенильных поверхностей, препятствуют непосредственному контакту этих поверхностей и образованию очагов схватывания.

Из теории окисления известно, что сплавы WC-TiC-Co с малым содержанием TiC (T5K10) обладают сравнительно низкой стойкостью окисления. На поверхности таких сплавов образуются окисные пленки, имеющие малую прочность и низкое сопротивление сдвигу, которые сравнительно легко разрушаются, превращаясь в мелкодисперсные продукты износа, что, кстати, является хорошей твердой смазкой, снижающей трение между контактными поверхностями.

О прочности окисной плёнки можно судить, сравнивая измеренную микротвердость самой плёнки, которая образуется после резания в среде кислорода, и неокисленного твёрдого сплава после заточки. Такое измерение не претендует на точное воспроизведение микротвердости плёнки, однако уменьшение её до 125 единиц характеризует тенденцию к снижению микротвердости окисной плёнки на сплаве T5K10. С другой стороны, кислород способствует образованию устойчивого нароста (рис. 2), что лучше защищает заднюю поверхность инструмента, и тогда изнашивание происходит в основном по передней поверхности в виде лунки на расстоянии примерно 1,5S от режущей кромки. При этом отмечается явная разница между формой и размерами нароста

в зависимости от того, образуются ли они в окислительных или в нейтральных средах, естественно, при прочих равных условиях резания. В среде кислорода нарост со значительно малым радиусом вершины имеет форму клина - такую самовозникающую форму, которая способствует процессу образования самоорганизующейся структуры стружки, продукта резания с наименьшими потоками внешней энергии [7].



*Рис. 2. Микрофотографии корней стружек, полученных при резании инструментом из T5K10 в среде кислорода (а) и аргона (б)*

Следует отметить, что в зависимости от среды отмечается значительная разница микротвёрдости самого нароста, что частично можно объяснить диффузионным насыщением кислорода сильно деформированными слоями

нароста. Согласно дислокационному механизму пластической деформации и упрочнения, можно было ожидать повышения микротвердости нароста в аргоне вследствие более высокой степени пластической деформации, но отмеченное явление в кислороде, согласно табл. 2, свидетельствует, что на поверхностях нароста существуют явно благоприятные условия для протекания химических реакций окисления и образования окислов, твердость которых превосходит микротвердость исходного металла.

Таблица 2

*Средняя микротвердость нароста в различных газовых средах*

Среда	Средняя микротвердость нароста, МПа		
	30 м/мин	50 м/мин	100 м/мин
Кислород	5000	4600	4150
Воздух	4650	4300	3950
Аргон	4250	3800	3750

Определенный интерес представляет исследование влияния газовых сред на процесс резания и изнашивания титановых сплавов, что обусловлено спецификой физико-механических и химических свойств этих сплавов.

При обработке сплава BT-14 инструментом из твердого сплава BK8, рекомендуемого при обработке титановых сплавов, установлено, что газовые среды практически не влияют на процесс резания титановых сплавов, несмотря на то, что сплав BT-14 имеет чрезвычайно большое сродство к активным газам, проникновению которых препятствует сплошной контакт между стружкой и резцом. С другой стороны, отмечается небольшое влияние газовых сред на процесс изнашивания режущего инструмента. При  $V = 50$  м/мин износ по задней грани  $h_z$  в воздухе для T15K6 составляет примерно 0,1 мм (путь резания 250 м), а в аргоне –  $h_z = 0,16$  мм (рис. 3). Здесь, по-видимому, сказывается некоторое ухудшение условий трения, а также более низкая теплопроводность аргона по сравнению с воздухом. Данные по изнашиванию резца в среде кислорода не были получены из-за самовозгорания титановой стружки.

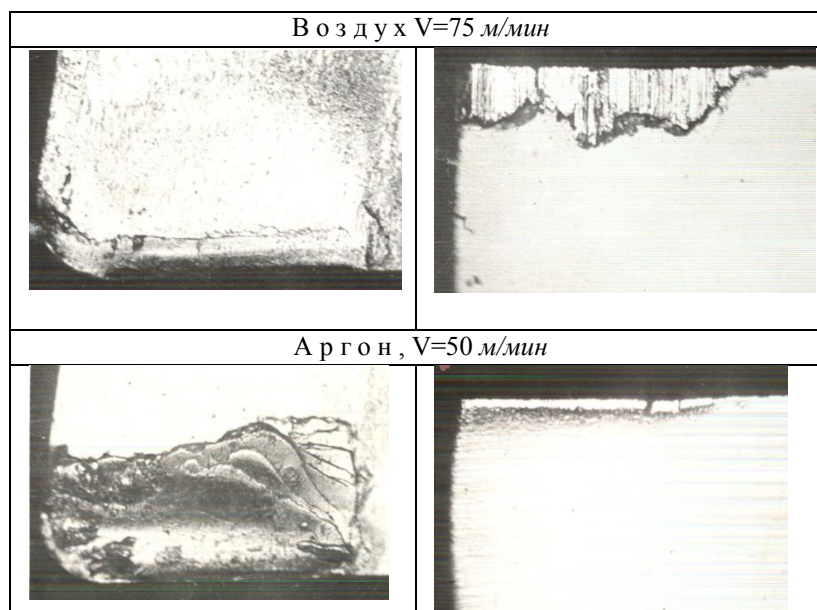


Рис. 3. Фотографии передней и задней поверхностей резца при резании титанового сплава VT-14 инструментом из ВК8 в различных газовых средах

**Выводы.** На основании экспериментальных данных можно заключить, что эффективность действия кислородной среды во многом зависит как от условий резания, так и от химического состава обрабатываемого и инструментального материалов. Кроме того, с повышением способности к окислению твердого сплава (при малом содержании TiC в сплаве, например, T5K10) в диапазоне скоростей адгезионного износа применение кислорода целесообразно, поскольку при этом значительно снижается износ инструмента, повышаются точность обработки (вследствие уменьшения размерного износа) и качество обработанной поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латышев В.Н., Наумов А.Г. Об эффективности использования кислорода в процессе резания // Высокие технологии в машиностроении: Сб. науч. трудов НТУ "ХПИ". – Харьков, 2001. – Вып. 1(4). – Электронная версия <http://users.kpi.kharkov.ua/cutting/izdaniya/>.
2. Касьян М.В., Парикян Ф.А. Эффективность действия газовых сред на процесс резания металлов // Известия НАН РА. Серия Техн. наук. – 1995. – Том 48, № 3. – С. 156-161.

3. **Кириллов А.К., Верещака А.С., Дюбнер Л.** Разработка системы экологически безопасной формообразующей обработки резанием // Высокие технологии в машиностроении: Сб. науч. трудов НТУ “ХПИ”. – Харьков, 2001. – Вып. 1(4). Электронная версия <http://users.kpi.kharkov.ua/cutting/izdanija/>
4. **Хоникомб Р.** Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
5. **Костецкий Б.И.** Трение, смазка и износ в машинах. – Киев: Техника, 1970. – 396 с.
6. **Носовский И.Г.** Влияние газовой среды на износ металлов. – Киев: Техника, 1968. – 179 с.
7. **Христафорян С.Ш.** О процессе резания материалов как самоорганизующейся структуре по переработке вещества // Изв. НАН РА. Серия Техн. наук. – 1999. – Том 52, № 2. – С. 145-152.

*Поступила в редакцию 13.01.2014.  
Принята к опубликованию 19.05.2014.*

### **ԳԱԶԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿՏՐՈՂ ԳՈՐԾԻՔԻ ՄԱՇՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑԻ ՎՐԱ**

**Ֆ.Հ. Փարիկյան, Ա.Ս. Բաբայան**

Ներկայացված են կտրող գործիքի մաշման գործընթացում գազային միջավայրերի ազդեցության հետազոտությունների արդյունքները: Ցույց է տրված գազային միջավայրի կիրառման իրական և նպատակաուղղված ազդեցության հնարավորությունը կտրման գործընթացի և գործիքի մաշման վրա: Թթվածնային միջավայրի արդյունավետությունը մեծ մասամբ կախված է ինչպես կտրման պայմաններից, այնպես էլ մշակվող և գործիքային նյութերի քիմիական բաղադրությունից:

**Առանցքային բաներ.** գազային միջավայր, կտրման ռեժիմներ, գործիքի մաշվածք:

### **THE GASEOUS MEDIA INFLUENCE ON THE CUTTING TOOL WEAR PROCESS**

**F.A. Parikyan, A.S. Babayan**

The results of investigation of the gaseous media influence on the process of the cutting tool wear are introduced. The possibility of realistic and purposeful influence of the gaseous media on the cutting and wear process of the tool is shown. The efficiency of the oxygen media largely depends on both the cutting conditions and the chemical composition of the processed and tool materials.

**Keywords:** gaseous medium, cutting conditions, tool wear.

**ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ СИЛ АКТИВНОГО ТРЕНИЯ  
НА ПЛОТНОСТЬ ПРЕССОВОК ПРИ ПРЕССОВАНИИ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛБАНИЙ**

**А.В. Артунян<sup>1</sup>, З.В. Вартазарян<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*NJUGOLD, Burbank, USA*

<sup>2</sup>*Государственный инженерный университет Армении (Политехник)*

Рассмотрены вопросы внешнего трения при прессовании и влияния на него ультразвуковых колебаний верхнего пуансона, верхнего и нижнего пуансонов, матрицы и матрицы совместно с пуансонами. Исследовано влияние длительности действия сил активного трения между прессуемым порошком и поверхностью пресс-формы на плотность прессовки.

**Ключевые слова:** прессование, порошок, ультразвуковые колебания (УЗК), пуансон, матрица.

**Введение.** Изделия из порошковых материалов находят все большее применение при изготовлении современной техники благодаря специальным характеристикам и возможности изготовления деталей без удаления материала с заготовок различными методами. При этом возникает задача возможного приближения набора их свойств к показателям сплошных материалов, что зависит от степени компактирования порошков, т.е. их плотности. Для достижения высокой плотности прессованных порошковых материалов следует обеспечить необходимое давление при формообразовании прессованного изделия. Однако это связано с необходимостью наличия соответствующего оборудования, обеспечивающего такие давления, а также пресс-форм, выдерживающих эти давления.

**Методы исследования.** Известно, что на равномерность распределения плотности прессовки по ее высоте  $h$  существенное влияние оказывает длительность действия сил активного трения  $t_1$  и  $t_2$  в прямом и обратном направлениях прессования [1]. Интервалы  $t_1$  и  $t_2$  зависят от амплитуды  $\xi_M$ , частоты  $\omega_M$  и фазы  $\varphi_M$  УЗК матрицы, скорости перемещения подвижного пуансона  $V_{ВП}$  и уровня исследуемого слоя порошка  $z_i$  относительно торца нижнего пуансона. Поэтому возможны различные случаи перемещения матрицы относительно слоев прессуемого порошка. Следовательно, при прессовании с применением УЗК матрицы суммарное время активного действия сил трения как

по направлению, так и против скорости движения верхнего пуансона для  $n$  слоев порошка, на которые разделена прессовка, будет

$$\begin{cases} t_1 = \frac{1}{\omega_M} \sum_{i=0}^n \arcsin(V_{B\Pi}(1 - z_i/h)/\xi_M \omega_M) + \varphi_M, \\ t_2 = \frac{2\pi n - 1}{\omega_M} \sum_{i=0}^n \arcsin(0.5 V_{B\Pi}(1 - z_i/h)/\xi_M \omega_M) + \varphi_M. \end{cases} \quad (1)$$

Эти выражения пригодны лишь для идеальных условий прессования порошков с применением УЗК матрицы, т.к. в реальности процесс осуществляется в условиях случайного изменения входящих в выражение (1) всех параметров. Учитывая, что в реальности они могут меняться в пределах допусков, заданных технических характеристик ультразвукового (УЗ) и прессового оборудования, все входные параметры процесса представляются в виде

$$x_{ji} = x_j \left( 1 - k_{x_j} \sin(2\pi f_{x_j} t_i + \varphi_{x_j}) k_{cx_j} / 100 \right), \quad (2)$$

где  $x_{ji}$  – величина  $x_j$ -го параметра в  $i$ -й момент времени;  $k_{x_j}$ ,  $f_{x_j}$  и  $\varphi_{x_j}$  – соответственно допуски на величины (%), частоты и фазы изменения  $x_j$ -го параметра;  $k_{cx_j}$  – коэффициент случайного изменения  $x_j$ -го параметра.

Следовательно, с учетом (2) из выражения (1) можно получить

$$\begin{cases} t_1 = \sum_{i=0}^n \frac{\arcsin(V_{B\Pi}(1 - z_i/h)/\xi_{Mi} \omega_{Mi}) + \varphi_{Mi}}{\omega_{Mi}}, \\ t_2 = (2\pi n - 1) \sum_{i=0}^n \frac{\arcsin(0.5 V_{B\Pi}(1 - z_i/h)/\xi_{Mi} \omega_{Mi}) + \varphi_{Mi}}{\omega_{Mi}}. \end{cases} \quad (3)$$

Иначе говоря, вместо усредненных значений величин  $t_1$  и  $t_2$ , определяемых по известным зависимостям, их более точно можно рассчитать посредством формулы (3). Однако простота этой формулы кажущаяся, поэтому она не может быть использована в условиях анализа процесса УЗ прессования порошков с применением УЗК матрицы, что обусловлено высокой степенью нелинейности выражения (3) и наличием в общем случае до 48 переменных факторов процесса.

Была поставлена задача разработки виртуального процесса прессования порошков с применением УЗК пуансонов и матрицы с помощью виртуальных приборов и инструментов программной среды LabView и создания виртуальной лаборатории для возможности проведения исследований с учетом отмеченных переменных факторов (рис. 1-4). Такая постановка задачи позволяет вместо чисто математического описания использовать модель в виде виртуального прибора. С учетом изложенного для определения интервалов времени  $t_1$  и  $t_2$  и изучения процесса УЗ прессования порошков была разработана универсальная виртуальная лаборатория, лицевая панель которой приведена на рис. 5.

За счет данной методики определения  $t_1$  и  $t_2$  стало возможным вместо трудоемкого отдельного решения уравнений (1) и последующего их

суммирования согласно (3) определить их в процессе самого прессования количеством положительных  $N_{+V}$  и отрицательных  $N_{-V}$  скоростей перемещения матрицы относительно всех слоев прессуемого порошка по выражениям:  $t_1 = N_{+V}dt$ ,  $t_2 = N_{-V}dt$ . Отметим, что это решение позволило получить высокую точность определения  $t_1$  и  $t_2$ , что связано с принятой величиной приращения времени  $dt = 1 \text{ мкс}$ .

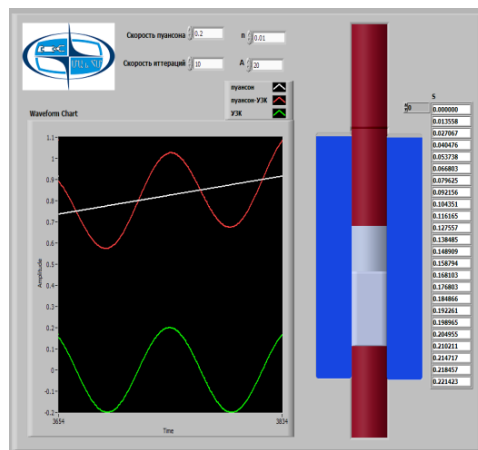


Рис. 1. Представление модели прессования порошка с применением УЗК матрицы и верхнего пуансона

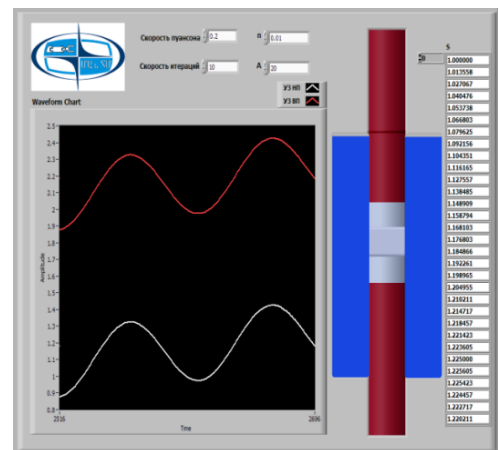


Рис. 2. Представление модели прессования порошка с применением УЗК матрицы и нижнего пуансона

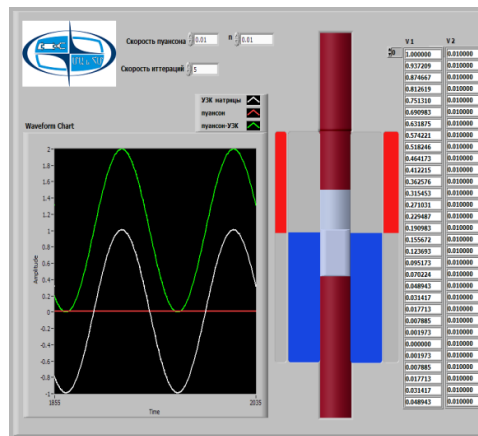


Рис. 3. Представление модели прессования порошка с применением движущейся вверх УЗК матрицы и верхнего и нижнего пуансонов

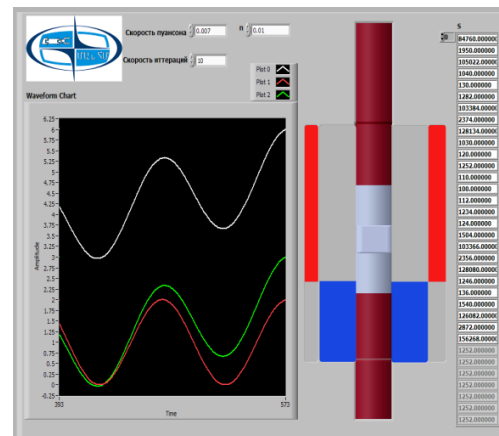


Рис. 4. Совмещенное представление модели прессования порошка с применением движущейся вниз УЗК матрицы и верхнего и нижнего пуансонов (общий случай)



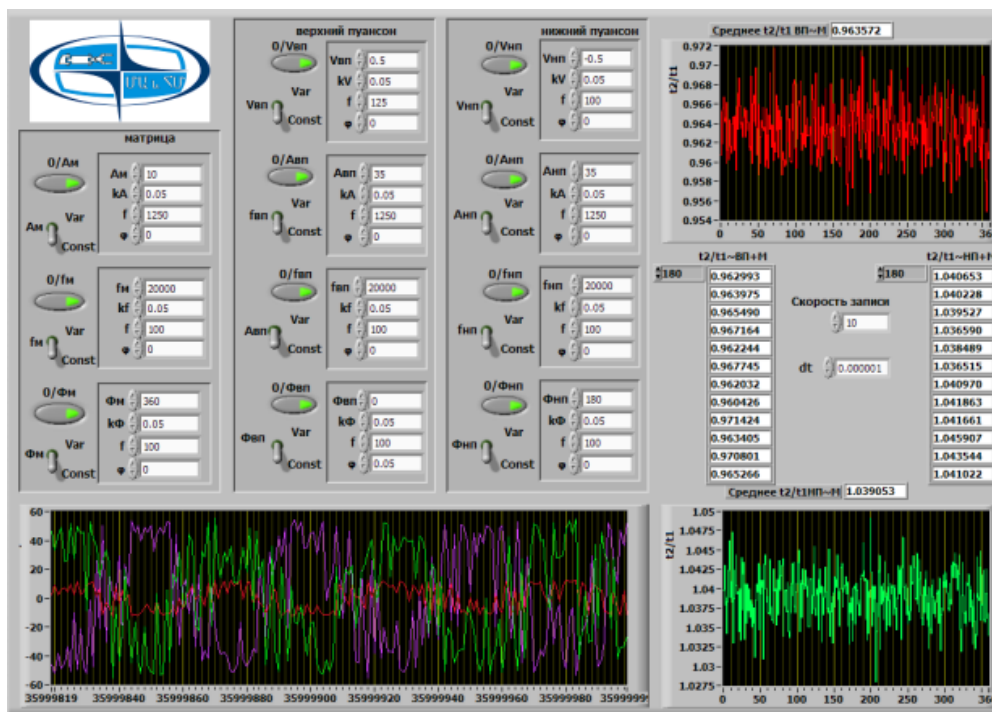


Рис. 5. Виртуальная лаборатория для исследования процесса прессования порошков с применением УЗК

**Результаты исследования.** В среде LabVIEW разработана математическая модель процесса УЗ прессования, позволяющая определить время воздействия силы активного трения на прессовку в прямом и обратном направлениях прессования, на основе которой установлены условия их равенства. С помощью этой модели установлено, что изменением только скоростей перемещения пуансонов, амплитуды УЗК пуансонов и матрицы нельзя обеспечить условие равенства времен действия сил активного трения в прямом и обратном направлениях прессования. Доказано, что наибольшее влияние на них оказывают сдвиги фаз УЗК матрицы и пуансона. При двустороннем прессовании это условие обеспечивается, когда УЗК пуансонов включены в противофазе, причем фаза колебаний матрицы находится в пределах  $150...170^\circ$ , верхнего пуансона -  $230...250^\circ$ , нижнего -  $50...70^\circ$ . При одностороннем прессовании это условие обеспечивается, когда фаза колебаний матрицы находится в пределах  $75...105^\circ$  и  $160...200^\circ$ , а пуансона – порядка  $120^\circ$  колебаний.

Проблема разработок, возникшая в связи с вопросом получения

специальных прессованных брикетов из  $Al_2O_3$  возможно высокой плотности, заключается в том, что в лодочки ограниченных размеров из молибдена в этом случае удастся уложить большую массу  $Al_2O_3$  и после получить кристалл большей массы. В качестве схемы наложения УЗК на процесс прессования порошков из  $Al_2O_3$  была принята наиболее зарекомендовавшая себя схема при прессовании порошков из драгметалла, а именно - крутильно-радиальные УЗК матрицы [2] и осевые УЗК пуансона.

На рис. 6а представлена зависимость плотности прессовки брикетов из  $Al_2O_3$  от амплитуды УЗК пуансона при неизменных статической нагрузке и амплитуде крутильно-радиальных УЗК матрицы. Плотность брикетов при амплитуде осевых УЗК пуансона 15 мкм возросла в 1,22 раза при статической нагрузке 5 кН и в 1,25 раза при статической нагрузке 10 кН по сравнению с плотностью брикетов, полученных при тех же статических нагрузках, но без применения УЗК. Проверка набора механических свойств цилиндрических брикетов подтвердила их улучшение и показала, что плотность брикетов из  $Al_2O_3$  возрастает в 1,17 раза при максимальных амплитудах осевых УЗК матрицы и статической нагрузке (рис. 6б). Конечно, этот показатель несколько слабее, чем в первом случае, но достаточен для реального повышения эффективности процессов выращивания кристаллов по схеме Багдасарова.

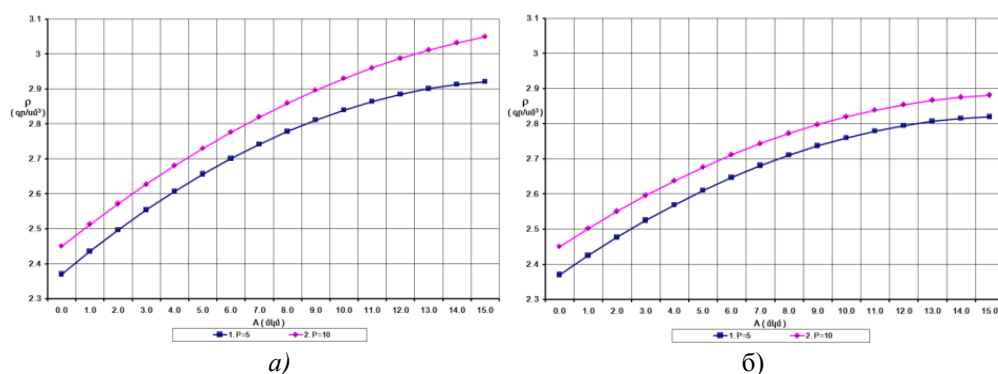


Рис. 6. Зависимость плотности прессовки порошка  $Al_2O_3$  от амплитуды УЗК: крутильно-радиальных УЗК матрицы и осевых УЗК пуансона (а), осевых УЗК пуансона и матрицы (б)

**Заключение.** С помощью разработанной в среде LabVIEW математической модели процесса УЗ прессования установлено, что изменением только скоростей перемещения пуансонов, амплитуды УЗК пуансонов и матрицы нельзя обеспечить условие равенства времен действия сил активного трения в прямом и обратном направлениях прессования. Доказано, что наибольшее влияние на них оказывают сдвиги фаз УЗК матрицы и пуансона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Артунян А.В.** Повышение эффективности процессов пластического деформирования с применением УЗК: Дис. ... к.т.н. – Ереван, 2008.
2. **Христафорян С.Ш., Артунян А.В.** Особенности процесса прессования материалов в закрытых объемах с использованием различных схем наложения УЗК // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2006. – Вып. 31. – С. 305-310.

*Поступила в редакцию 15.03.2014.  
Принята к опубликованию 19.05.2014.*

### ԳԵՐՁԱՅԱՆԱՅԻՆ ՏԱՏԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՄԱՄԲ ՄԱՍԼՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ՄԱՍԼՎԱԾՔՆԵՐԻ ԽՏՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ԱԿՏԻՎ ՇՓՄԱՆ ՈՒԺԵՐԻ ԱՋԴՄԱՆ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅԱՆ ԱՋԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

**Ա.Վ. Արթունյան, Զ.Վ. Վարդազարյան**

Դիտարկված են մամլման դեպքում արտաքին շփման, վերին մամլամատի, վերին ու ստորին մամլամատերի, մամլակաղապարի, համատեղ մամլամատերի ու մամլակաղապարի գերձայնային տատանումների ազդեցության հարցերը: Հետազոտված է մամլվող նյութի և մամլակաղապարի մակերևույթի միջև ակտիվ շփման ուժերի ազդման տևողության ազդեցությունը մամլվածքի խտության վրա:

**Առանցքային բաներ.** մամլում, փոշենյութ, գերձայնային տատանումներ (ԳՁՏ), մամլամատ, մամլակաղապար:

### THE INFLUENCE OF ACTIVE FRICTION OPERATION FORCE DURATION ON THE DENSITY OF COMPACTS COMPRESSED UNDER ULTRASONIC VIBRATIONS

**A.V. Artunyan, Z.V. Vartazaryan**

The problem of external friction at compressing, and the effects on it of ultrasonic vibrations of the upper punch, the upper and lower punches, the matrix and the matrices with a punch are considered. The issues of influence on the duration of the active forces of friction between the mold surface and the density of the compressed powder are investigated.

**Keywords:** extrusion, powder, ultrasonic vibrations (USV), punch, matrix.

УДК 656.13

## **ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЗНОГО МЕХАНИЗМА АВТОМОБИЛЯ ОТ ФОРМЫ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУЩИХСЯ ПАР**

**Г.С. Ерицян**

*Государственный инженерный университет Армении (Политехник)*

На эффективность тормозных механизмов автомобилей значительное влияние оказывает форма поверхности трущихся пар. Получена общая формула, с помощью которой определяется момент силы трения для любой поверхности соприкосновения трущихся пар.

**Ключевые слова:** тормозной момент, фрикционный тормозной механизм, неподвижный блок, показатель размерности, форма поверхности.

**Введение.** Современная автомобильная промышленность увеличивает грузоподъемность и скорость выпускаемых автомобилей. Это выгодно с позиции экономического развития. При этом на первое место выдвигается задача обеспечения уровня конструктивной безопасности автомобиля. В частности, речь идет о тормозных механизмах, которые должны надежно и эффективно работать как при аварийных торможениях, так и при непрерывном применении тормозов на затяжных спусках.

На современный подвижной состав автомобильного транспорта устанавливаются тормозные механизмы, фрикционная пара которых имеет плоскую (дисковую) или цилиндрическую (барабанную) поверхность трения.

Развиваемый тормозной момент этих механизмов достаточно хорошо изучен в работах [1-3]. Однако возможно, что фрикционная пара тормозного механизма имеет другую форму поверхности, например, коническую или сферическую.

С учетом вышесказанного весьма актуальной задачей является определение тормозного момента механизмов с нетрадиционными формами трущихся поверхностей.

**Постановка задачи.** Целью работы является установление зависимости эффективности тормозного механизма от формы поверхности фрикционной пары. Исходя из поставленной цели, важной теоретической и практической задачей является получение общей формулы, с помощью которой можно определить тормозные моменты фрикционных механизмов с различными

формами трущихся поверхностей, т.е. установить изменение тормозного момента в зависимости от формы трущихся элементов.

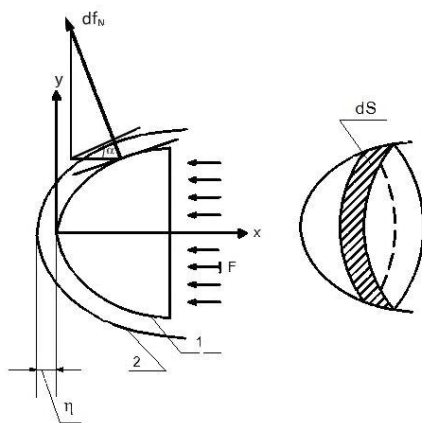
**Методы исследования.** Для решения этой задачи допустим, что тормозные механизмы имеют разные по форме поверхности трущихся пар: плоская (дисковая), коническая, параболическая и сферическая. При этом все типы имеют одинаковые размеры рабочих поверхностей (поверхности ограничены теми же радиусами), одинаковые коэффициенты трения трущихся элементов, а также одинаковые силы, передаваемые фрикционным парам тормозными приводами.

Пусть сечение контактной поверхности вращения плоскостью, проходящей через ось вращения, задается уравнением

$$y=f(x). \quad (1)$$

На рисунке для конкретности изображена параболическая поверхность вращения, в осевом сечении которой имеем следующую связь между  $y$  и  $x$ :

$$y^2=kx. \quad (2)$$



*Рис. Фрикционный тормозной механизм с параболическими элементами трения: 1 и 2 - блоки*

При воздействии силы  $F$  на блок 1 он перемещается на  $\eta$  влево. При перемещении этого блока влево перемещение полоски в нормальном направлении ( $\eta_n$ ) будет

$$\eta_n = \frac{\eta y'}{\sqrt{1+(y')^2}}. \quad (3)$$

Вследствие этого перемещения в части неподвижного блока, соприкасающегося к указанной полоске, возникает сила, пропорциональная (в первом приближении) величине  $\eta_n$  и поверхности полоски:

$$df_n = A\eta_n dS = A\eta \frac{y'}{\sqrt{1+(y')^2}} \frac{2\pi y dx}{\cos\alpha}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - угол между касательной поверхности в осевом сечении и осью  $x$ . Так как  $\operatorname{tg}\alpha = y'$ ,

то

$$\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+(y')^2}}. \quad (6)$$

Поэтому

$$df_n = A\eta_n dS = A\eta \frac{y'}{\sqrt{1+(y')^2}} \frac{2\pi y dx}{\frac{1}{\sqrt{1+(y')^2}}} = A\eta 2\pi y y' dx. \quad (7)$$

Для силы  $df$ , направленной параллельно внешней силе  $F$ , будем иметь

$$df = df_n \frac{1}{\sin\alpha} = A\eta 2\pi y y' dx \frac{1}{\frac{y'}{\sqrt{1+(y')^2}}} = A\eta 2\pi y \sqrt{1+(y')^2} dx. \quad (8)$$

Полная сила  $F$  равна

$$F = \int_{x=0}^a df = \int_{x=0}^a A\eta 2\pi y \sqrt{1+(y')^2} dx. \quad (9)$$

Отсюда получаем

$$A\eta = \frac{F}{\int_{x=0}^a 2\pi y \sqrt{1+(y')^2} dx}. \quad (10)$$

Для нормальной силы  $df_n$  из (7) и (10) имеем

$$df = \frac{F}{\int_{x=0}^a 2\pi y \sqrt{1+(y')^2} dx} 2\pi y y' dx. \quad (11)$$

Момент силы трения, обусловленный силой  $df_n$ , будет

$$dM = \frac{\mu F}{\int_{x=0}^a 2\pi y \sqrt{1+(y')^2} dx} 2\pi y y' dx y, \quad (12)$$

т.е.

$$dM = \frac{\mu F}{\int_{x=0}^a 2\pi y \sqrt{1+(y')^2} dx} 2\pi y^2 y' dx. \quad (13)$$

Для момента силы трения получим

$$M = \mu F \frac{\int_{x=0}^a y^2 y' dx}{\int_{x=0}^a y \sqrt{1+(y')^2} dx}. \quad (14)$$

С помощью формулы (14) определяется момент силы трения для любой заданной поверхности соприкосновения трущихся пар.

Попытаемся получить из (14) момент силы трения для плоской поверхности трения. Дело в том, что для такой поверхности  $y' = \infty$ , а интегрирование по поверхности означает интегрирование по  $y$ , а не по  $x$ , так как для любой точки поверхности  $x=0$ . Получить выражение  $M$  можно, заметив, что  $y'dx=dy$ . Тогда из (14) имеем

$$M = \mu F \frac{\int_{y=r}^{y=R} y^2 dy}{\int_{y=r}^{y=R} y dy}, \quad (15)$$

где  $r$  и  $R$  - внутренний и внешний радиусы трущихся дисков.

Из (15) имеем

$$M = \mu F \frac{\frac{1}{3} y^3 \Big|_r^R}{\frac{1}{2} y^2 \Big|_r^R} = \mu F \frac{2}{3} \frac{(R^3 - r^3)}{(R^2 - r^2)} = \frac{2}{3} \mu F \frac{R^2 + Rr + r^2}{R + r}, \quad (16)$$

т.е. получаем известный момент силы трения для плоской пары:

$$M_{пл} = \frac{2}{3} \mu F \frac{R^2 + Rr + r^2}{R + r}. \quad (17)$$

Для конической пары будем иметь

$$y=kx, y'=k, \quad (18)$$

$$M_k = \mu F \frac{\int_0^a k^3 x^2 dx}{\int_0^a kx\sqrt{1+k^2} dx} = \frac{2}{3} \mu F a \frac{k^2}{\sqrt{1+k^2}}. \quad (19)$$

Для параболической пары  $y = k\sqrt{x}$ .

$$M_{нар} = \mu F \frac{\int_0^a k^2 x \frac{k}{2\sqrt{x}} dx}{\int_0^a k\sqrt{x} \sqrt{1+\frac{k^2}{4x}} dx} = \frac{1}{2} k^2 \mu F \frac{\int \sqrt{x} dx}{\int \sqrt{x+\frac{k^2}{4}} dx} = \frac{1}{2} k^2 \mu F \frac{a^{\frac{3}{2}}}{\left(a+\frac{k^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{k^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (20)$$

Для сферической пары радиусом R:

$$y^2 + (R-x)^2 = R^2 \quad (21)$$

имеем

$$y = \sqrt{R^2 - (R-x)^2}, \quad (22)$$

$$y' = \frac{2(R-x)}{2\sqrt{R^2 - (R-x)^2}}. \quad (23)$$

Поставив (22) и (23) в (14), получаем

$$M_{сф} = \mu F \frac{\int_{x=0}^b \sqrt{R^2 - (R-x)^2} (R-x) dx}{\int_{x=0}^b R dx}. \quad (24)$$

Отметим, что  $b \leq R$ .

В результате интегрирования получаем

$$M_{сф} = \frac{1}{3} \mu F \frac{\left[ R^2 - (R-b)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{Rb}. \quad (25)$$

Для полусферы  $b=R$  получаем

$$M_{сф} = \frac{1}{3} \mu F R. \quad (26)$$

Полученная формула (14) пригодна, как было отмечено выше, для любой поверхности соприкосновения трущихся пар, в частности, для параболической поверхности  $y=kx^m$  с любым  $m$ , а не только для параболической поверхности (2).



Отметим, что величина  $k$  для конусообразной поверхности безразмерна, а в случае параболы имеет размерность  $L^{1/2}$ . Для парабол с разными показателями ( $y=kx^m$ ) размерности  $k$  будут разные:  $[k]=L^{(1-m)}$ .

**Выводы.** Получены формулы для тормозного момента с параметризацией формы поверхностей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришкевич А.И. Автомобили. Теория.- Минск: Высшая школа, 1986.- 207 с.
2. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств.- М.: Машиностроение, 1989.- 240 с.
3. Макапетян Г.В. Теория автомобиля и трактора (на арм. языке).- Ереван: Луйс, 1989.- 351 с.

*Поступила в редакцию 20.02.2013.  
Принята к опубликованию 19.05.2014.*

### ԱՎՏՈՄՈԲԻԼԻ ԱՐԳԵԼԱԿԱՅԻՆ ՄԵԽԱՆԻԶՄԻ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿԱԽՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆԸ ՇՓՎՈՂ ԶՈՒՅԳԻ ՀՊՄԱՆ ՄԱԿԵՐԵՎՈՒՅԹԻ ՁԵՎԻՑ

**Գ.Ս. Երիցյան**

Արգելակային մեխանիզմների արդյունավետության վրա էական ազդեցություն ունի մեխանիզմի շփվող զույգի մակերևույթի ձևը: Ստացվել է ընդհանուր բանաձև, որով որոշվում է կամայական ձևի մակերևույթով շփվող զույգի շփման ուժի մոմենտը:

**Առանցքային բաներ.** արգելակային մոմենտ, շփման արգելակային մեխանիզմ, անշարժ բլոկ, չափողականության ցուցանիշ, մակերևույթի ձև:

### DEPENDENCE OF THE AUTOMOBILE BRAKE GEAR EFFICIENCY ON THE FORM OF THE CONTACT SURFACE OF FRICTION PAIRS

**G.S. Yeritsyan**

The surface form of the friction pair has a significant influence on the efficiency of the brake gear. A general formula is obtained developed which determines the friction force torque of the friction pair with any surface.

**Keywords:** braking torque, friction brake gear, fixed block, dimension exponent, surface form.

**ПОГОСЯН АЛЬБЕРТ КНЯЗЕВИЧ  
(1940-2014)**



22 февраля 2014г. на 74 году жизни скончался видный ученый в области трибологии, материаловедения и машиноведения, член Всемирного Совета по трибологии (WTC), член-корреспондент Национальной Академии наук РА, доктор технических наук, профессор Погосян Альберт Князевич. Альберт Князевич руководил проблемной лабораторией по трибологии ГИУА и являлся членом двух специализированных советов по машиноведению и материаловедению ВАК Республики Армения.

Погосян А.К. основал школу по трибологии в Армении. Большое прикладное значение имеют полученные им такие инженерные решения, как выявление новых подходов по экспериментальной оценке расчетных методов и выбору материалов для тормозных устройств и подшипников скольжения; оценка механизма износа металлополимерных самосмазывающихся пар трения при высоких температурах; целенаправленное создание антифрикционных полимерных материалов, пластичных масел, смазок и присадок; комплексный анализ свойств полезных ископаемых Армении, а также выявление механизма их физико-химической модификации.

Профессор А.К. Погосян – известный ученый не только в нашей стране, но и за ее пределами. В качестве научного работника для проведения совместных исследований он был приглашен в Кембриджский университет в лабораторию Кавендиша (Англия, 1972-1973), Мичиганский университет (США, 1978-1979), Имперский колледж Лондона (Англия, 1986), Афинский национальный технический университет (Греция, 1995), Государственный университет Айовы (США, 2003). Участвовал на 15 международных симпозиумах и 47 научных конференциях, являлся научным руководителем одного доктора наук, 12 кандидатов наук, 18 магистерских диссертаций.

Огромен список научных работ профессора А.К. Погосяна: 400 научных публикаций, 7 книг, 24 изобретения и 12 патентов, в том числе: монография “Трение и износ наполненных полимерных материалов” (Москва, 1977), соавторство в советско-американской книге “Трибология СССР и США” (Москва - Нью-Йорк), книги “Антифрикционные эпоксидные композиты в станкостроении” (Минск, 1992), “Основы трибологии” (Ереван - Афины, 1995) и армяно-русско-английский терминологический словарь к дисциплине “Основы расчета и проектирования машин”.

Профессор А.К. Погосян навсегда останется в памяти близких, коллег, учеников и друзей.

## **К 70-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА**

### **Дорогие друзья и коллеги!**

Прошло 70 лет со дня основания Машиностроительного факультета нашего университета. Это были годы становления высшего технического образования в Республике Армения. В стенах университета для развивающейся экономики республики была подготовлена армия инженерных кадров и исследователей различного профиля, которая своим трудом вывела экономику страны на передовые позиции среди республик СССР. За этот период в стенах университета были подготовлены педагогические и научные кадры машиностроителей, основались научные школы, успехи которых общепризнаны.

До Великой Отечественной войны, когда промышленность Армении начала бурно развиваться и производить широкий спектр машиностроительной продукции (металлорежущие станки, электрические машины, компрессоры, насосы и др.), в республике встала острая необходимость в подготовке национальных инженерных кадров для машиностроения и смежных отраслей, таких как: горнодобывающая, химическая, строительная, пищевая и др., так как в этот период специалисты машиностроительного профиля приглашались из различных промышленных центров СССР. В 1943 году Советом Министров СССР было принято постановление о формировании Машиностроительного факультета в ЕрПИ, а в 1949 году институт дал первый выпуск инженеров по специальности “Технология машиностроения”. В течение четверти века на факультете открывается ряд новых специальностей: “Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты” (1944), “Строительные и дорожные машины и оборудование” (1959), “Машины и аппараты химической промышленности” (1960), “Литейное производство черных и цветных металлов” (1960), “Машины и технологии литейного производства” (1960), “Машины и технологии обработки материалов давлением” (1961), “Автомобили и тракторы” (1965), “Материаловедение, машины и аппараты термообработки” (1965), “Автоматизация и комплексная механизация машиностроения” (1965), “Машины и аппараты пищевых производств” (1966), “Холодильные и компрессорные машины и оборудование” (1967), “Экономика и организация машиностроительной промышленности” (1967). Подготовка инженеров-механиков и машиностроителей осуществлялась также в форме вечернего и заочного образования как в Ереване, так и в филиалах ЕрПИ - в городах

Ленинакане и Кировакане, а также на Ереванском заводе “Армэлектромаш”, а в дальнейшем и в филиале в г. Горисе.

В ЕрПИ были проведены фундаментальные исследования по развитию теории резания материалов, оптимизации процессов резания и расширению возможностей вихрекопировальных процессов. Ряд участников исследования были удостоены Государственной премии Армянской ССР. Проведены исследования электрофизических методов обработки и использования синтетического корунда в качестве инструментального материала, разработан безвершинный инструмент для резания материалов, явившийся основой для совершенствования процессов обработки тел вращения. Проведены исследования процессов резания с применением ультразвука (УЗ) и прерывистого резания, резания материалов в вакууме и газовых средах и деформационного упрочнения обработанной поверхности обкаткой в газовых средах. В лаборатории “Реология резания” ЕрПИ выполнены работы по изучению процесса шлифования и созданию алмазного инструмента с программным расположением алмазных зерен, разработаны передовые технологии обработки отверстий. Исследованы вопросы точности асинхронных электродвигателей и разработан метод экструзии для изготовления станин асинхронных электродвигателей, удостоенный премии Совета Министров СССР.

Важные работы выполнены в области УЗ технологий, такие как: разработка способов пропитки обмоток статора электродвигателей и очистки изделий, получение заготовок и твердых сплавов методом прессования металло-керамических порошков и порошков для выращивания синтетических кристаллов, формирование деталей из пластмассы, исследование процессов размерной УЗ обработки твердых сплавов, процессов УЗ точения, зубодолбления, шевингования и шабрения, УЗ сварки, прессования порошков и деформирования в закрытых объемах с применением пространственных УЗ колебаний. Большинство результатов исследований были внедрены на киевских предприятиях им. Артема, КИАПО, УкрНИАТ.

Были спроектированы, изготовлены и внедрены в производство: автомат пайки выводов конденсаторов, удостоенный на ВДНХ СССР диплома первой степени, а авторы – золотых медалей; многониточные станы для УЗ волочения тонких проволок из драгметаллов, внедренные в Ереванском ювелирном заводе (ЕЮЗ); роторный автомат прессовки таблеток, представленный на международной выставке в Лейпциге. Проведены исследования по автоматизации производственных процессов на ЕрАЗ и проектированию инструментов сложного профиля, в том числе из композиционных материалов, а также механизмов станочных систем и двигателей внутреннего сгорания.

В начале четвертого десятилетия Механико-машиностроительный факультет был разделен на два факультета: Машиностроительный и Механический, что было вызвано необходимостью их оптимального управления. Механический факультет развивал свою деятельность благодаря существенным внедрениям разработанных технологий и конструкций в производство летательной техники, успешной работе лаборатории “УЗ техника и технологии” и серьезным достижениям в вопросах разработки новейшей теории резания. По известным причинам в этот период упал интерес выпускников школ к инженерным специальностям. В рамках реформ ГИУА факультет начал проводить обучение по трем образовательным программам – бакалавра, магистра и инженера-исследователя. Защиты магистерских диссертаций, докторской диссертации по теории резания и нескольких кандидатских диссертаций показали, что был заложен фундамент для дальнейшего развития образования и науки на факультете. К началу нового тысячелетия факультет выполнил уже три финансируемых научно-исследовательских проекта, а сотрудники факультета активно публикуются и получают патенты РА. Активная работа дала положительные результаты – в 2003 году сотрудники факультета по итогам десятилетия получили две первые премии за лучшую научную работу и лучший патент. В этом же году была защищена еще одна докторская диссертация в области УЗ резания, автор которой в дальнейшем подготовил несколько кандидатов и двух докторов технических наук.

В 2003 году правительство РА для сохранения научного потенциала республики и выполнения финансируемых из бюджета научно-исследовательских работ, имеющих важнейшее научно-прикладное значение, объявило конкурс. Заявка Машиностроительного факультета ГИУА по теме “Реологические основы совершенствования современных технологий машиностроения” в 2004 году была утверждена в качестве одной из приоритетных. Была организована базовая лаборатория “Машиностроительные технологии” (МТ). В 2006 году кафедра АиКММ и базовая лаборатория “МТ”, а также АОЗТ “Гоар” решением Совета Международного союза машиностроителей (IUMB) приняты в коллективные члены Союза, а научный руководитель лаборатории был избран в Совет IUMB.

Сформировались деловые образовательные и научные контакты с передовыми научными центрами и университетами стран СНГ и дальнего зарубежья. Так, сотрудники факультета провели исследования по теме “Проектирование и динамический расчет моделей коленвалов, поршней и шатунов” для австрийской фирмы AVL List GmbH, которые были приняты и использованы в каталоге фирмы. Сотрудники лаборатории “МТ” совместно с университетом им. Отто-фон-Герике (Магдебург) в рамках гранта “VOLKSWAGEN” выполнили исследования по улучшению технологий изготовления двигателей внутреннего

сгорания. Ученые ГИУА, активно сотрудничая с IUMB, участвовали на всех Международных научно-технических конференциях “Машиностроение и техносфера XXI века”. Множество представленных от ГИУА докладов были удостоены дипломов конференций, а в Армении было организовано представительство IUMB. По итогам деятельности ГИУА был удостоен диплома первой степени за заслуги в развитии машиностроения и международное сотрудничество.

Естественно, что такое начало восстановления утерянных связей должно было привести к положительным сдвигам. В 2008 году в Ереване была организована Международная научно-техническая конференция “Машиностроительные технологии и техника автоматизации - 2008”, а в 2012 году проведена третья конференция “Машиностроительные технологии и техника автоматизации - 2012”, посвященная 80-летию ГИУА (Политехник). В работах конференций приняли участие председатель IUMB, председатель президиума ассоциации технологов-машиностроителей России, руководители технических университетов, научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий стран СНГ, Германии, Польши и др. Были изданы три сборника научных трудов конференций, а пленарным докладом конференции “Машиностроительные технологии и техника автоматизации - 2012” был посвящен отдельный номер журнала “Научные технологии машиностроения”, издаваемого московским издательством “Машиностроение”.

Мир техники и техносферы стремительно развивается и обновляется, и эти процессы непрерывно активизируются и углубляются в связи с глобализацией экономики. При этом возникающие изменения в техносфере настолько глубоки, что требуют всестороннего анализа происходящих процессов и выработки адекватных решений, в том числе и в вопросе инженерного образования, поэтому для решения проблем мировой экономики диалог ученых, специалистов высшей школы и производителей востребован реалиями XXI века. Мы думаем, что проведение международной конференции “Машиностроительные технологии и техника автоматизации - 2014”, посвященной юбилею, послужит делу обмена и получения современной информации, развития сотрудничества, личных творческих связей. Оргкомитет убежден, что конференция пройдет плодотворно и насыщенно, способствуя консолидации ученых и специалистов различных стран, широкому обмену информацией, и даст импульс для дальнейшего развития машиностроения и техносферы в республике.

Редколлегия Вестника поздравляет факультет “Машиностроение” ГИУА со славным юбилеем.

### ՀԵՂԻՆԱԿՆԵՐԻ ՑՈՒՑԱԿ

1. Ավետիսյան Արա Սերգեյի – ֆ.-մ.գ.դ., թղթակից անդամ, ՀՀ ԳԱԱ Մեխանիկայի ինստիտուտ
2. Արթունյան Արմեն Վահեի – տ.գ.թ., դոցենտ, ինժեներ – դիզայներ, «NJUGOLD», ՄՄՆ
3. Արշակյան Արմեն Լյուդվիկի – տ.գ.թ., դոցենտ, Մեքենաշինական ֆակուլտետի դեկան, ՀՊՃՀ
4. Բաբայան Արփենիկ Սոփ – տ.գ.թ., դոցենտ, «Մեքենաշինության ավտոմատացում և համալիր մեքենայացում» ամբիոն, ՀՊՃՀ
5. Բալասանյան Բորիս Սերգեյի – տ.գ.դ., պրոֆեսոր, «Մեքենաշինության ավտոմատացում և համալիր մեքենայացում» ամբիոնի վարիչ, ՀՊՃՀ
6. Բալասանյան Արամ Բորիսի – տ.գ.թ., դոցենտ, «Մեքենաշինության ավտոմատացում և համալիր մեքենայացում» ամբիոն, ՀՊՃՀ
7. Գևորգյան Հրանտ Արարատի – տ.գ.թ., գիտաշխատող, ՀՀ ԳԱԱ Մեխանիկայի ինստիտուտ
8. Գևորգյան Վահան Ռուբենի – ասպիրանտ, «Մեքենաների մասեր» ամբիոն, Իլմենաուի տեխնիկական համալսարան, Գերմանիա
9. Դարբինյան Հրայր Վահրամի – տ.գ.թ., նոր նախագծերի բաժնի դեկավար, «Shanghai Kunjek Handtool & Hardware Co.» ՍՊԸ, Չինաստան
10. Դարբինյան Վահրամ Հրայրի – ասպիրանտ, “Տեղեկատվական անվտանգություն և ծրագրային ապահովում” ամբիոն, ՀՊՃՀ
11. Երիցյան Գագիկ Սուրենի – տ.գ.դ., դոցենտ, «Փոխադրումների և ճանապարհային երթևեկության կազմակերպում» ամբիոնի վարիչ, ՀՊՃՀ
12. Խրիստաֆորյան Ստեփան Շմավոնի – տ.գ.դ., պրոֆեսոր, «Մեքենաշինական տեխնոլոգիաներ» բազային լաբ. վարիչ, ՀՊՃՀ
13. Կլեոցին Ուլֆ – տ.գ.դ., «Մեքենաների մասեր» ամբիոնի վարիչ, Իլմենաուի տեխնիկական համալսարան, Գերմանիա
14. Հակոբյան Խաչատուր Ներսեսի – հայցորդ, «Մեքենաշինական արտադրության տեխնոլոգիաներ և սարքավորումներ» ամբիոն, ՀՊՃՀ
15. Հարությունյան Լևոն Արսենի – ֆ.-մ.գ.թ., ՀՀ ԳԱԱ Մեխանիկայի ինստիտուտ
16. Մայրաբենկո Ալեքսանդր Դմիտրիի – տ.գ.դ., պրոֆեսոր, «Առևտրային և զովազդային սարքավորումներ» ամբիոնի վարիչ, Բելառուսի ազգային տեխնիկական համալսարան
17. Շեկյան Հասմելտ Գուրգենի – տ.գ.դ., պրոֆեսոր, ՀՀ ԳԱԱ Մեխանիկայի ինստիտուտ
18. Սաղաթեյան Միքայել Քերոբի – ֆ.-մ.գ.թ., «Ընդհանուր մաթեմատիկական կրթություն» ամբիոն, ՀՊՃՀ
19. Սեբեր Բրետտ Ֆիլիպ – նախագահ, «ՍեբերԿոր» ՍՊԸ, ԱՄՆ
20. Վարդազարյան Զարուհի Վլադիմիրի – մագիստրոս, ավագ գիտաշխատող, «Մեքենաշինական տեխնոլոգիաներ» բազային լաբ. վարիչ, ՀՊՃՀ
21. Փարիկյան Ֆելիքս Հարությունի – տ.գ.թ., դոցենտ, «Մեքենաշինության ավտոմատացում և համալիր մեքենայացում» ամբիոն, ՀՊՃՀ
22. Քամայան Անդրանիկ Արմենի – ասպիրանտ, Մաթեմատիկայի և մեխանիկայի ֆակուլտետ, ԵՊՀ
23. Քրիստափորյան Էռնեստ Ստեփանի – տ.գ.թ., ավագ գիտաշխատող, «Մեքենաշինական տեխնոլոգիաներ» բազային լաբորատորիա, ՀՊՃՀ

## СПИСОК АВТОРОВ

1. Аветисян Ара Сергеевич – д. физ.-мат. н., член-корреспондент, Институт механики, НАН РА
2. Акопян Хачатур Нерсесович – соискатель, кафедра “Технологии и оборудование машиностроительного производства”, ГИУА
3. Аргунян Армен Вагеевич – к.т.н., доцент, инженер-дизайнер, “NJUGOLD”, США
4. Арутюнян Левон Арсенович – к. физ.-мат. н., Институт механики, НАН РА
5. Аршакян Армен Людвигович – к.т.н., доцент, декан Машиностроительного факультета, ГИУА
6. Бабаян Арпеник Сосевна – к.т.н., доцент, кафедра “Автоматизация и комплексная механизация машиностроения”, ГИУА
7. Баласанян Арам Борисович – к.т.н., доцент, кафедра “Автоматизация и комплексная механизация машиностроения”, ГИУА
8. Баласанян Борис Сергеевич – д.т.н., профессор, зав. кафедрой “Автоматизация и комплексная механизация машиностроения”, ГИУА
9. Вардазарян Зарине Владимировна – магистр, старший научный сотрудник, базовая лаб. “Машиностроительные технологии”, ГИУА
10. Геворкян Ваган Рубенович – аспирант, кафедра “Детали машин”, Технический университет Илменау, Германия
11. Геворкян Грант Араратович – к.т.н., научный сотрудник Института механики, НАН РА
12. Дарбинян Ваграм Грайрович – аспирант, кафедра “Информационная безопасность и программное обеспечение”, ГИУА
13. Дарбинян Грайр Ваграмович – к.т.н., руководитель отдела новых разработок, ООО “Shanghai Kunjek Handtool & Hardware Co.”, Китай
14. Ерицян Гагик Суренович – д.т.н., доцент, зав. кафедрой “Организация перевозок и дорожного движения”, ГИУА
15. Камалян Андраник Арменович – аспирант, факультет Математики и механики, ЕГУ
16. Клетцин Улф – д.т.н., зав. кафедрой “Детали машин”, Технический университет Илменау, Германия
17. Маляренко Александр Дмитриевич – д.т.н., профессор, зав. кафедрой “Торговое и рекламное оборудование”, Белорусский национальный технический университет, Беларусь
18. Парикян Феликс Арутюнович – к.т.н., доцент, кафедра “Автоматизация и комплексная механизация машиностроения”, ГИУА
19. Сагателян Михаил Керопович – к. физ.-мат. н., кафедра “Общее математическое образование”, ГИУА
20. Себер Бретт Филлип – президент ООО “СеберКор”, США
21. Христафорян Степан Шмавонович – д.т.н., профессор, зав. базовой лабораторией “Машиностроительные технологии”, ГИУА
22. Христафорян Эрнест Степанович – к.т.н., старший научный сотрудник, базовая лаб. “Машиностроительные технологии”, ГИУА
23. Шемян Гамлет Гургенович – д.т.н., профессор, Институт механики, НАН РА



## LIST OF THE AUTHORS

- 1 Arshakyan Armen Lyudvik – Cand. of tech. sci., Associate Professor, Dean of Machine-Building Faculty, SEUA
- 2 Artunyan Armen Vahe – Cand. of tech. sci., Associate Professor, engineer-designer, “NJUGOLD”, USA
- 3 Avetisyan Ara Sergey – Doctor of phys.-math.sci., corr.member, Institute of Mechanics, RA NAS
- 4 Babayan Arpenik Sos – Cand. of tech. sci., Associate Professor of the Chair “Automation and Complex Mechanization of Machine Building”, SEUA
- 5 Balasanyan Armen Boris – Cand. of tech. sci., Associate Professor of the Chair “Automation and Complex Mechanization of Machine Building”, SEUA
- 6 Balasanyan Boris Sergey – Doctor of tech.sci., Professor, Head of the Chair “Automation and Complex Mechanization of Machine Building”, SEUA
- 7 Darbinyan Hrayr Vahram – Cand. of tech. sci., Product Development Manager, “Shanghai Kunjek Handtool & Hardware Co. “ Ltd, Shanghai, China
- 8 Darbinyan Vahram Hrayr – Post-graduate student of the Chair “Information Security and Software”, SEUA
- 9 Gevorkyan Hrant Ararat – Cand. of tech. sci., Scientific Worker, Institute of Mechanics, RA NAS
- 10 Gevorkyan Vahan Ruben – Post-graduate student of the Chair “Machine Details”, Technical University of Ilmenau, Germany
- 11 Hakobyan Khachatur Nerses – Probationer of the Chair “Technologies and equipment of machine-building industry”, SEUA
- 12 Harutyunyan Levon Arsen – Cand. of phys.-math. sci., Institute of Mechanics, RA NAS
- 13 Khristaforyan Ernest Stepan – Cand. of tech. sci., Senior Scientific Worker, basic lab. "Machine Building Technologies", SEUA
- 14 Khristaforyan Stepan Shmavon – Doctor of tech.sci., Professor, Head of the basic lab. "Machine Building Technologies", SEUA
- 15 Kletzin Ulf – Doctor of tech. sci., Head of the Chair “Machine Details”, Technical University of Ilmenau, Germany
- 16 Malyarenko Alexandr Dmitriy – Doctor of tech.sci., Professor, Head of the Chair “Trading and Advertising Equipment”, Belarusian National Technical University
- 17 Parikyan Pheliks Harutyun – Cand. of tech. sci., Associate Professor of the Chair “Automation and Complex Mechanization of Machine Building”, SEUA
- 18 Qamalyan Andranik Armen – Post-graduate student, Mathematics and Mechanics Dean, YSU
- 19 Saghatelian Michael Kerob – Cand. of phys.-math. sci. of the Chair “Advanced Mathematics”, SEUA
- 20 Seber Brett Phillip – President of “Sebercor” LLC, USA
- 21 Shekyan Hamlet Gurgen – Doctor of tech.sci., Professor, Institute of Mechanics, RA NAS
- 22 Vartazaryan Zarine Vladimir – master, Senior Scientific Worker, basic lab. "Machine Building Technologies", SEUA
- 23 Yeritsyan Gagik Suren – Doctor of tech.sci., Associate Professor, Head of the Chair “Organization of transportation and road traffic”, SEUA

## ՀՈՂՎԱԾՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ ԿԱՆՈՆՆԵՐԸ

Հայաստանի պետական ճարտարագիտական համալսարանի (Պոլիտեխնիկ) «Բանբեր» ամսագիրը գրախոսվող հանդես է, որը հրատարակվում է ճյուղային գիտատեխնիկական, նաև ակնարկային-վերլուծական բնույթի հոդվածներ, հաղորդումներ, ինչպես և տվյալ բնագավառի անվանի գիտնականների հորելյաններին, նոր գրքերին, համալսարանի մասնակցությամբ կայացած գիտաժողովներին նվիրված նյութեր, խմբագրությանն ուղղված նամակներ:

Նյութը խմբագրություն ներկայացվում է համաձայն հետևյալ պահանջների.

1. Երկու օրինակ, նաև էլեկտրոնային տարբերակով ([banber\\_mm@seua.am](mailto:banber_mm@seua.am)), համակարգչային շարվածքը՝ Microsoft Office Word: Հոդվածի ծավալը կարող է լինել մինչև 10 էջ, հաղորդումներինը՝ մինչև 4 էջ: Տեքստը շարադրվում է A4 չափսի թղթի վրա, աշխատանքային դաշտը՝ Top-5սմ, Bottom-5,1սմ, Left-5,75սմ, Right-1,75սմ, Fottter-4,6սմ, միջտողային տարածությունը (Line spacing)՝ 1,1, պարբերությունը (First line)՝ 0,75 սմ: Հայերեն լինելու դեպքում նյութը շարադրվում է GHEA Grapalat տառատեսակով, տառաչափը՝ 10, իսկ ռուսերենի կամ անգլերենի դեպքում՝ Times New Roman տառատեսակով, տառաչափը՝ 11:

2. Թղթի վերևի ծախս անկումում գրվում է համապիտանի տասնորդական դարականիշը՝ տեքստին համապատասխան լեզվով (ՀՏԴ, ՄԴԿ, UDC), հաջորդ տողի կենտրոնում վերնագիրը՝ գլխատառերով, հաջորդ տողում հեղինակ(ներ)ի անվան-հայրանվան սկզբնատառերը և ազգանուն(ներ)ը՝ bold, 10 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 11 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, մեկ տող ներքև՝ հեղինակ(ներ)ի աշխատավայրը՝ italic, 9 տառաչափով՝ հայերեն և 10 տառաչափով՝ ռուսերեն և անգլերեն:

3. Նյութը սկսվում է ամփոփումով (անտացիա) այն լեզվով, որով ներկայացված է: Ամփոփումն ավարտվում է առանցքային բառերով՝ տառաչափը՝ 9 հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, և միայն «Առանցքային բառեր» արտահայտությունը՝ bold, italic: Ամփոփումը պետք է լինի 50-60 բառ, առանցքային բառերը կամ բառակապակցությունները՝ 4-8 բառ:

4. Երաշխավորվում է նյութի շարադրման հետևյալ կարգը. «Ներածություն», որը պետք է համառոտ ներառի հարցի վիճակը, թեմայի արդիականությունը և հետազոտության նպատակը, «Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը», «Հետազոտության արդյունքները», «Եզրակացություն», անհրաժեշտության դեպքում՝ նաև այլ բաժիններ՝ համապատասխան ենթավերնագրերով:

5. Տեքստում հղումները գրականությանը նշվում են ուղղանկյուն փակագծերով: Բանաձևերը ներկայացվում են նոր տողից, Equation Editor ծրագրով, italic, տառաչափը՝ 11, անհրաժեշտության դեպքում համարակալվում են տողի վերջում՝ սովորական (կոր) փակագծով:

6. Նկարներն ու աղյուսակները հաջորդում են տեքստում համապատասխան հղումներին: «Նկ.» և «Աղյուսակ» բառերը, նկարների մակագրությունը և աղյուսակների անվանումները գրվում են Italic 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում:

7. Տեքստին հաջորդում է գրականության ցանկը՝ 9 տառաչափով հայերեն տեքստի դեպքում և 10 տառաչափով՝ անգլերեն և ռուսերեն տեքստերի դեպքում, միայն հեղինակի ազգանունն ու անվան-հայրանվան սկզբնատառերը՝ bold, «Գրականության ցանկ» արտահայտությունը՝ տողի կենտրոնում, գլխատառերով: Ցանկում գրականության յուրաքանչյուր աղբյուր համարակալվում է ըստ տեքստում իր հղման հերթականության: Գրականության աղբյուրները պարբերական հրատարակությունների դեպքում ներկայացվում են հետևյալ կարգով. **հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը**, վերնագիրը, հանդեսի անվանումը կամ ընդունված հապավումը, հրատարակման տարեթիվը, հատորի ու թողարկման համարները, հերթական համարը, նյութի զետեղման էջերը, գրքերի դեպքում՝ **հեղինակի ազգանունը, անվան-հայրանվան սկզբնատառերը**, վերնագիրը, հրատարակման վայրը, հրատարակչությունը, թվականը, էջերի քանակը:

8. Գրականության ցանկին հաջորդում են ամփոփումները մյուս երկու լեզուներով (եթե տեքստը հայերեն է, ամփոփումները նախ՝ ռուսերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե ռուսերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ անգլերեն, եթե անգլերեն է, նախ՝ հայերեն, ապա՝ ռուսերեն): Ամփոփումները բոլոր երեք լեզուներով իրենց բովանդակությամբ և առանցքային բառերով պետք է լինեն նույնական:

9. Տեքստը ստորագրվում է հեղինակ(ներ)ի կողմից, նշվում է նյութը խմբագրություն հանձնելու ամսաթիվը: Տեքստի խմբագրված և սրբագրված տարբերակը համաձայնեցվում է հեղինակ(ներ)ի հետ:

10. Հեղինակ(ներ)ն առանձին էջով ներկայացնում է (են) ազգանուն, անուն, հայրանունը (լրիվ), աշխատավայրի, սովորելու վայրի լրիվ անվանումը, զբաղեցրած պաշտոնը, գիտական աստիճանը, հեռախոսահամարները (աշխատանքային, տան և քջային):

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Вестник Государственного инженерного университета Армении (ПОЛИТЕХНИК) – рецензируемый журнал, в котором публикуются статьи научно-технического характера, сообщения, заказные обзорно-аналитические статьи, а также материалы, посвященные юбилеям известных в данной области ученых, новым книгам, научным конференциям при участии университета, и письма в адрес редакции.

Материал представляется в редакцию в соответствии со следующими правилами:

1. Статья в двух экземплярах и файл статьи ([banber\\_mm@seua.am](mailto:banber_mm@seua.am)) в формате Microsoft Office Word. Объем статьи не должен превышать 10 страниц, объем сообщений – до 4-х страниц. Формат страницы – А4. Рабочее поле: Top – 5cm, Bottom – 5,1cm, Left – 5,75cm, Right – 1,75cm, Footer – 4,6cm, межстрочный интервал (Line spacing) – 1,1, красная строка (First line) – 0,75cm. Для статьи, написанной на армянском языке, применяется шрифт GHEA Grapalat (размер шрифта – 10), а на русском и английском – Times New Roman (размер шрифта – 11).

2. В левом верхнем углу первого листа указывается универсальный десятичный классификатор (ՀՏԴ, УДК, UDC); строкой ниже по центру указывается название статьи – заглавными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм.яз., 11 – на рус. и англ. яз., строкой ниже – инициалы (И.О.) и фамилия – строчными буквами, шрифт Bold, размер 10 – на арм.яз., 11 – на рус. и англ. яз., выравнивание по центру; строкой ниже – место работы – шрифт italic, размер 9.

3. Материал текста начинается с аннотации и представляется на том языке, на котором написана статья. Текст аннотации должен включать 50-60 слов. После аннотации пишутся ключевые слова – от 4-х до 8-и слов или словосочетаний. Размер текста аннотации и ключевых слов 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз., словосочетание «**Ключевые слова**» – Bold, italic.

4. Рекомендуется следующий порядок изложения материала статьи: введение, в котором должны быть кратко представлены состояние вопроса, актуальность темы и цель исследования; постановка задачи и обоснование методики; результаты исследования; заключение (эти, а при необходимости, и другие разделы должны иметь соответствующие заголовки).

5. Ссылки на литературу в тексте даются в квадратных скобках. Формулы и математические выражения набираются редактором Microsoft Equation, italic, размер – 11. Формулы набираются с новой строки, выравнивание по центру. При необходимости, их нумеруют. Номер формулы располагается в конце строки, в круглых скобках.

6. Рисунки и таблицы располагаются в тексте по ходу ссылки на них. Слова «Рис.», «Таблица», а также названия рисунков и таблиц пишутся italic, размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз.

7. В конце статьи дается список литературы: размер 9 – на арм.яз., 10 – на рус. и англ. яз. Словосочетание «**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**» располагается в центре строки заглавными буквами, Bold. Цитированная литература нумеруется в порядке ссылки на нее в тексте. Каждый источник представляется в следующем порядке: в случае ссылки на статью из журнала: **фамилия, инициалы И.О.** – Bold, название статьи, название журнала, место издания, год издания, том и номер издания, с какой по какую страницы занимает статья в этом журнале; в случае ссылки на книгу: **фамилия, инициалы И.О.**, название книги, место издания, название издательства, год издания, общее количество страниц.

8. После литературы представляются аннотации вместе с ключевыми словами на двух других языках. Если статья написана на армянском языке, то сначала дается аннотация на русском языке, затем на английском; если написана на русском языке – соответственно на армянском и английском, а если на английском – соответственно на армянском и русском языках. Содержание аннотаций и ключевые слова должны быть на трех языках одинаковыми.

9. Статья подписывается автором (авторами). В конце статьи ставится дата (число, месяц, год) представления статьи. Отредактированный и откорректированный вариант рукописи согласовывается с автором (авторами).

10. На отдельной странице необходимо представить следующие авторские данные: фамилия, имя, отчество; полное наименование места работы, места учебы; занимаемая должность, ученая степень и звание; номера телефонов (служебный, домашний, мобильный).

## RULES FOR PREPARATING THE MANUSCRIPTS

Proceedings of State Engineering University of Armenia (Polytechnic) is a peer-reviewed journal which publishes scientific-technical and also analytic-review papers, short communications, as well as materials about the jubilees of prominent scientists, new books, scientific conferences coorganized by the University, letters addressed to the editorial board.

The material should be presented to the editorial staff in accordance with the requirements given below.

1. The authors are requested to submit two hard copies, and also the electronic version ([banber\\_mm@seua.am](mailto:banber_mm@seua.am)) of the manuscript by Microsoft Office Word. The volume of scientific paper is limited to 10 pages, and to 4 pages for short communications. The text should be printed on A4 sized paper. The text margins should be: Top – 5cm, Bottom – 5.1 cm, Left – 5.75 cm, Right – 1.75 cm, Footer – 4.6 cm, Line-spacing – 1.1 cm, the first line – 0.75 cm. Texts in Armenian should be printed by the GHEA Grapalat, font size 10, and the texts in Russian or English – by Times New Roman, in font size 11.

2. On the top left corner of the first page, the Universal Decimal Classifier is placed (ՀՏՂ, ՄԴԿ, UDC). The title of the article in capital letters, bold, font size 10 for texts in Armenian, and 11 – for Russian and English should be placed in the centre of the next line. The initials and the surname(s) in small letters and bold, in font size 10, for texts in Armenian, and in font size 11 for the ones in English and Russian should be lined up in the centre of the next line. In the following line, the workplace of the author(s) should be mentioned, italic, font size 9.

3. The text begins with an abstract in the language it is presented. The abstract should include 50-60 words. It ends with keywords in font size 9 for texts in Armenian, and in font size 10 for the ones in English and Russian. Only the word “Keywords” should be bold, italic. The summary should not exceed 5 lines, the number, of keywords or word combinations - 4-8. The papers should include an introduction briefly introducing the state of the problem area, the importance of the subject and the aim of investigation, as well as sections describing the statement of the problem and selection of the methodology, the results of investigation, conclusion (other sections if necessary) with subtitles, and it should end with the list of references.

4. The references in the text should be given in square brackets. The formulae should be introduced by the Microsoft Equation Editor. They are printed from a new line in italic, font size 11 in the center of the line, and if necessary numbered at the end of the line in round brackets..

5. Figures and tables should follow their references given in the text. The words “Fig”, “Table”, the figure inscriptions and the table names should be printed in italic, in font size 9, for texts in Armenian, and in font size 10 for texts in English and Russian.

6. The text is followed by the references in font size 9 for texts in Armenian and in font size 10 for texts in English and Russian. Only the author’s initials and surname should be bold. The word “References” should be placed in the center of the line in capital letters. In the list of references, each source should be enumerated according to its reference number in the text. For the periodicals the references should be introduced in the following style: **the author’s surname, initials**, title, year, numbers of the volume and the issue, page numbers, and for books – **the authors’ names**, full title, publication place, publisher, year, the total number of pages.

7. The references are followed by the abstracts in the other two languages. If the text is in Armenian, the abstracts should be first in Russian and then in English. The text in Russian should be followed first by Armenian and then by English abstracts, while the texts in English should be followed first by Armenian, then by Russian abstracts. The abstracts in all the three languages should be identical in content and keywords.

8. The manuscript should be signed by the author(s) with the indication of the submission date. The edited and proofread version of the manuscript should be agreed upon by the author(s).

10. On a separate page, the author(s) should introduce his/her/their full surname(s), name(s), patronymic(s); the full name(s) of the employment place, the educational institution; the position occupied, the scientific degree, the telephone numbers (office, home, mobile).

**ԲԱՆԲԵՐ**  
ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ՃԱՐՏԱՐԱԳԻՏԱԿԱՆ  
ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆԻ (ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿ)

**Սերիա** ՄԵԽԱՆԻԿԱ, ՄԵՔԵՆԱԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆ,  
ՄԵՔԵՆԱՇԻՆՈՒԹՅՈՒՆ

**ВЕСТНИК**  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНЖЕНЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА  
АРМЕНИИ (ПОЛИТЕХНИК)

**Серия** МЕХАНИКА, МАШИНОВЕДЕНИЕ,  
МАШИНОСТРОЕНИЕ

**PROCEEDINGS**  
OF STATE ENGINEERING UNIVERSITY  
OF ARMENIA (POLYTECHNIC)

**Series** MECHANICS, MACHINE SCIENCE,  
MACHINE-BUILDING

**2014**

**1**

**Թողարկում**  
**Выпуск**  
**Issue**

**17**

Հրատ. խմբագիր՝ ԺԱՆՆԱ Ս. ՍԵՅՐԱՆՅԱՆ  
Խմբագիրներ՝ ՀԱՍՄԻԿ Յ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ  
ՀԱՍՄԻԿ Զ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ  
Շապիկի ձևավորումը՝ ԷԴՈՒԱՐԴ ԿՈՒՐԴԻՆՅԱՆԻ

Ստորագրված է տպագրության՝ 10.06.2014թ.:  
Թուղթը՝ «օֆսեթ»Տպագրությունը՝ ուղղ, ֆորմատ՝ (70x100) 1/16:  
Շարվածը՝ համակարգչային:  
Տառատեսակը՝ Times New Roman, GHEA Grapalat: 8 տպ. մամ.:  
Պատվեր՝ 276 Տպաքանակ՝ 120

Հայաստանի Պետական  
Ճարտարագիտական  
Համալսարանի տպարան  
Երևան, Տերյան 105,  
Հեռ.՝ 520 356

Типография Государственного  
Инженерного Университета  
Армении  
Ереван, ул. Тeryан 105,  
Тел.: 520 356

Printing house of State  
Engineering University  
of Armenia  
105 Teryan str. Yerevan,  
Tel. 520 356