



Издается с 2004 года

DOI: [10.12737/issue_59353e29359d42.0143447](https://doi.org/10.12737/issue_59353e29359d42.0143447)

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)

Председатель редакционного совета - Федонин О.Н., д-р техн. наук, проф.

Заместитель председателя редакционного совета Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф.

Редакционный совет:

Абрамов А.А., д-р техн. наук, проф. (Москва)

Аверченков В.И., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Агеев Е.В., д-р техн. наук, проф. (Курск)

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, проф. (Москва)

Анцев В.Ю., д-р техн. наук, проф. (Тула)

Бабичев А.П., д-р техн. наук, проф. (Ростов-на-Дону)

Безъязычный В.Ф., д-р техн. наук, проф. (Рыбинск)

Бухач А., д-р техн. наук, проф. (Польша)

Буяновский И.А., д-р техн. наук, проф. (Москва)

Вайнер Л.Г., д-р техн. наук, доц. (Хабаровск)

Волохов Г.М., д-р техн. наук, проф. (Коломна)

Горленко О.А., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Давыдов С.В., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Дьяконов А.А., д-р техн. наук, проф. (Челябинск)

Ивахненко А.Г., д-р техн. наук, проф. (Курск)

Клименко С.А., д-р техн. наук, проф. (Украина)

Кобищанов В.В., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Константинов И.С., д-р техн. наук, проф. (Белгород)

Космодамианский А.С., д-р техн. наук, проф. (Москва)

Макаренко К.В., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Мокрицкий Б.Я., д-р техн. наук, проф. (Комсомольск-на-Амуре)

Пестер А., д-р техн. наук, проф. (Австрия)

Петрешин Д.И., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Протасьев В.Б., д-р техн. наук, проф. (Тула)

Савин Л.А., д-р техн. наук, проф. (Орел)

Смоленцев В.П., д-р техн. наук, проф. (Воронеж)

Соловьев Д.Л., д-р техн. наук, проф. (Муром)

Степанов Ю.С., д-р техн. наук, проф. (Орел)

Суслов А.Г., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Хандожко А.В., д-р техн. наук, проф. (Брянск)

Хейфец М.Л., д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Химухин С.Н., д-р техн. наук, проф. (Хабаровск)

Янюшкин А.С., д-р техн. наук, проф. (Братск)

Редколлегия

Главный редактор - Киричек А.В., д-р техн. наук, проф.

Зам. главного редактора - Морозова А.В., канд. соц. наук

Отв. секретарь - Татаринцев В.А., канд. техн. наук

Корректор - Ерохина В.А.

Редактор - Щербакова М.Л.

Адрес редакции

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
(4832) 58-82-77

Сайт: <http://vestnik.tu-bryansk.ru>

E-mail: vestnik@tu-bryansk.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство ПИ № ФС77-21709 от 17 августа 2005 года

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении или непосредственно в редакции журнала. Индексы по каталогу «Пресса России»: 18945 – полугодовая; 15621 – годовая

Журнал включен в специализированный референтный библиографический сервис CrossRef

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по группам специальностей

05.02.00 – Машиностроение и машиноведение

05.16.00 – Металлургия и материаловедение

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление

05.22.00 – Транспорт

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Вестник Брянского государственного технического университета», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

© Брянский государственный технический университет, 2017

BULLETIN

SCIENTIFIC
TECHNICAL
JOURNAL

of BRYANSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

№ 6 (59)
2017

Issued since 2004

DOI: [10.12737/issue_59353e29359d42.01434475](https://doi.org/10.12737/issue_59353e29359d42.01434475)

Founder and Publisher – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Bryansk State Technical University” (BSTU)

Chairman of Editorial Council – **O.N. Fedonin**, D.Eng., Prof.Vice-Chairman of Editorial Council – **E.A. Pamfilov**, D.Eng., Prof.

Editorial Council:

A.A. Abramov, D.Eng., Prof., (Moscow)**V.I. Averchenkov**, D.Eng., Prof., (Bryansk)**E.V. Ageev**, D.Eng., Prof., (Kursk)**A.Yu. Albagachiev**, D.Eng., Prof., (Moscow)**V.Yu. Antsev**, D.Eng., Prof., (Tula)**A.P. Babichev**, D.Eng., Prof., (Rostov-upon-Don)**V.F. Bezyazychny**, D.Eng., Prof., (Rybinsk)**A. Bukhach**, D.Eng., Prof., (Poland)**I. A. Buyanovsky**, D.Eng., Prof., (Moscow)**L.G. Vainer**, D.Eng., Assistant Prof., (Khabarovsk)**G.M. Volokhov**, D.Eng., Prof., (Kolomna)**O.A. Gorlenko**, D.Eng., Prof., (Bryansk)**S.V. Davydov**, D.Eng., Prof., (Bryansk)**A. A. D'yakonov**, D.Eng., Prof., (Chelyabinsk)**A.G. Ivakhnenko**, D.Eng., Prof., (Kursk)**S.A. Klimenko**, D.Eng., Prof., (Ukraine)**V.V. Kobishchanov**, D.Eng., Prof., (Bryansk)**I.S. Konstantinov**, D.Eng., Prof., (Belgorod)**A.S. Kosmodamianskiy**, D.Eng., Prof., (Moscow)**K.V. Makarenko**, D.Eng., Prof., (Bryansk)**B.Ya. Mokritsky**, D.Eng., Prof., (Komsomolsk-upon Amur)**A. Pester**, D.Eng., Prof., (Austria)**D.I. Petreshin**, D.Eng., Prof., (Bryansk)**V.B. Protasiev**, D.Eng., Prof., (Tula)**L.A. Savin**, D.Eng., Prof., (Orel)**V.P. Smolentsev**, D.Eng., Prof., (Voronezh)**D.L. Solovyov**, D.Eng., Prof., (Murom)**Yu.S. Stepanov**, D.Eng., Prof., (Orel)**A.G. Suslov**, D.Eng., Prof., (Bryansk)**A.V. Khandozhko**, D.Eng., Prof., (Bryansk)**M.L. Kheifits**, D.Eng., Prof., (Belarus)**S.N. Khimukhin**, D.Eng., Prof., (Khabarovsk)**A.S. Yanyushkin**, D.Eng., Prof., (Bratsk)

Editorial Board:

Editor-in-Chief – **A.V. Kirichek**, D.Eng., Prof.Deputy Editor-in-Chief – **A.V. Morozova**, Can.Sociol. Sc.Executive Secretary – **V.A. Tatarintsev**, Can.Eng.Proof-reader – **V.A. Yerokhina**Editor – **M.L. Shcherbakova**

Editorial Office Address:

7, 50 years of October Boulevard, Bryansk, 241035, Russia

Phone: (4832) 58-82-77

Site: <http://vestnik.tu-bryansk.ru>E-mail: vestnik@tu-bryansk.ru

A journal is registered in Federal Service for supervision of law observance in mass communications and cultural heritage protection. Certificate ПИ № ФС77-21709 of August 17, 2005

A journal is spread through a subscription which may be drawn up in any post-office or directly in the editorial office of the journal. Indices on the catalogue “Russia Press”: 18945 – for semi-annual subscription; 15621 – for annual subscription

Journal is included in a specialized consultant bibliographical service CrossRef

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal “Bulletin of Bryansk State technical University” is allowed only with the Editorial Board’s permission and a reference to the source of information

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

Зернин М.В. Гибридный конечный элемент для моделирования напряженного состояния у вершин трещин в трехмерных телах 4

Никонов А.А., Каменева А.Л. Математическое описание режущей кромки сложнопрофильного резца и универсальная методика расчета геометрии срезаемого слоя 14

Куликов М.Ю., Ягодкин М.В. Повышение надёжности процесса резьбонарезания в отверстиях сверхмалых диаметров 24

Куликов М.Ю., Попов А.Ю., Волков Д.В. Реализация ротационного точения в производственных условиях 28

Панайоти В.А. Исследование теплового режима при шлифовании с применением твердых смазок 32

Информатика, вычислительная техника и управление

Андриянов А.И., Анисимов А.А. Активный силовой фильтр последовательного типа с усовершенствованной системой управления 39

Логвин В.А., Терешко И.В., Редько-Бодмер В.В., Шептунов С.А. Использование фотоэлектрического способа контроля видимого излучения тлеющего разряда при создании автоматизированной технологической среды для обработки материалов 47

Шептунов С.А., Кулиев Р.И., Кулиев Т.И., Нахушев Р.С., Закиров Р.И., Шевхужев А.О. Основные направления развития человеко-машинных интерфейсов и примеры их использования 57

Металлургия и материаловедение

Бурый Г.Г. Совершенствование процесса подбора модификатора чугуна 63

Транспорт

Воробьев В.И., Измеров О.В., Маслов М.А. Выбор объектной модели тягового привода локомотива 69

Макаревич Д.М., Макаревич С. Д. Двигательный асинхронный железнодорожный привод 76

CONTENTS

Mechanical engineering and engineering science

M.V. Zernin. Hybrid finite element for simulation of stress state at crack top in 3d bodies 4

A.A. Nikonov, A.L. Kameneva. Mathematical description of complex cutter cutting edge and universal procedure for geometry computation of layer cut 14

M.Yu. Kulikov, M.V. Yagodkin. Reliability increase of thread cutting in supersmall holes 24

M.Yu. Kulikov, A.Yu. Popov, D.V. Volkov. Rotary turning realization under production conditions 28

V.A. Panaioty. Investigation of heat mode at grinding using solid lubricants 32

Informatics, computer engineering and management

A.I. Andriyanov, A.A. Anisimov. Active power filter of sequential type with updated system of control 39

V.A. Logvin, I.V. Tereshko, V.V. Redko-Bodmer, S.A. Sheptunov. Use of photoelectric method for control of glow discharge visible radiation at creation of automated technological environment for material machining 47

S.A. Sheptunov, R.I. Kuliev, T.I. Kulive, R.S. Nakhushhev, R.I. Zakirov, A.O. Shevkhuzhev. Basic directions in development of man-machine interfaces and examples of their use 57

Metallurgy and materials science

G.G. Bury. Perfection of cast iron modifier selection process 63

Transportation means

V.I. Vorobiev, O.V. Izmerov, M.A. Maslov. Object model of locomotive traction drive 69

D.M. Makarevich, S.D. Makarevich. Motor asynchronous railway drive 76

Машиностроение и машиноведение

УДК 531/534+519.6

DOI: 10.12737/article_59cd76c49ad923.69778681

М.В.Зернин

ГИБРИДНЫЙ КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ У ВЕРШИН ТРЕЩИН В ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЛАХ

Сформулированы требования в конечном элементу для моделирования сингулярного поля напряжений у вершины трещины. Приведены основные соотношения для аппроксимации искомых параметров в двадцатиузловом конечном элементе трехмерной задачи. Кроме совместных функций формы введены также сингулярные функции напряжений и перемещений. Получены выражения для матриц жесткости такого гибридного элемента.

На серии тестовых примеров продемонстрирована достаточная точность таких гибридных аппроксимаций при сравнительно крупных конечноэлементных сетках.

Ключевые слова: коэффициент интенсивности напряжений, метод конечных элементов, сингулярные функции, гибридные аппроксимации, гибридный конечный элемент, тестовые задачи.

M.V. Zernin

HYBRID FINITE ELEMENT FOR SIMULATION OF STRESS STATE AT CRACK TOP IN 3D BODIES

The peculiarities of a stress field and deformations at a crack top located in 3D bodies at complex stressed state are characterized. The requirements to a final element for the simulation of a singular field of stresses at the crack top are formulated. Basic correlations for the approximation of these parameters in a twenty-unit finite element of a three-dimensional problem are shown. Besides joint functions of the form there are introduced also singular functions of stresses

and movements. Expressions for rigidity matrices of such a hybrid element are obtained. By a set of test examples there is shown a sufficient accuracy of such hybrid approximations at comparatively large finite element grids.

Key words: stress intensity factor, finite element method, singular functions, hybrid finite element, hybrid approximations, test problems.

Постановка задачи

Практически всегда в реальных материалах имеются исходные трещиноподобные дефекты. Рассмотрим участок упругого тела с фронтом трещины, который находится в условиях сложного напряженного состояния (СНС). При СНС требуется определять все три моды (три типа трещин на рис. 1а-в), различающиеся видами деформации трещины [1; 2], в соответствии с которыми ставят нижний индекс при коэффициенте интенсивности напряжений (КИН). Тип I - нормальный отрыв или разрыв ($K_{II} = K_{III} = 0$, $K_I \neq 0$). Перемещения берегов трещины происходят вдоль нормали к исходной поверхности трещины. Тип II - поперечный сдвиг ($K_I = K_{III} = 0$, $K_{II} \neq 0$). Тип III - продольный сдвиг ($K_I = K_{II} = 0$, $K_{III} \neq 0$).

В механике разрушения необходимо находить решение соответствующей зада-

чи теории упругости для тела с разрезами нулевой толщины. Такие задачи относятся к сингулярным краевым задачам, т.е. к граничным задачам с особыми точками. К особым точкам относится точка вершины трещины (рис. 2а, б), поскольку решения теории упругости для напряжений и деформаций в этой точке стремятся к бесконечности (рис. 2в). Результаты решения задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) у вершины трещины нормального отрыва (рис. 1а) можно представить в виде [1; 2]

$$U_i = \frac{K}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} F_i(\mu, \theta); \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta); \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \varphi_{ij}(\theta), \quad (3)$$

где r и θ – полярные координаты (рис. 1г и 2а); U_i – компоненты поля перемещений; σ_{ij} – компоненты поля напряжений (рис.

1г); ε_{ij} – компоненты поля деформаций; G – модуль упругости при сдвиге; μ – коэффициент Пуассона.

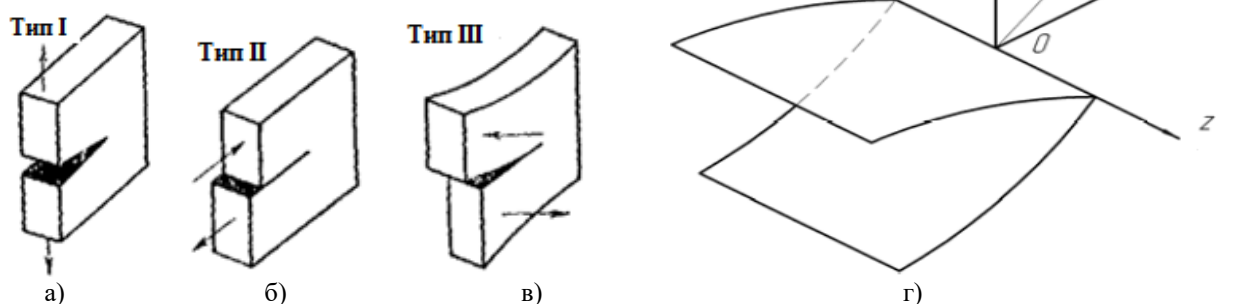


Рис. 1. Схематическое изображение трещины нормального отрыва (а), поперечного сдвига (б), продольного сдвига (в) и компоненты напряжений вблизи вершины трещины в трехмерном представлении (г)

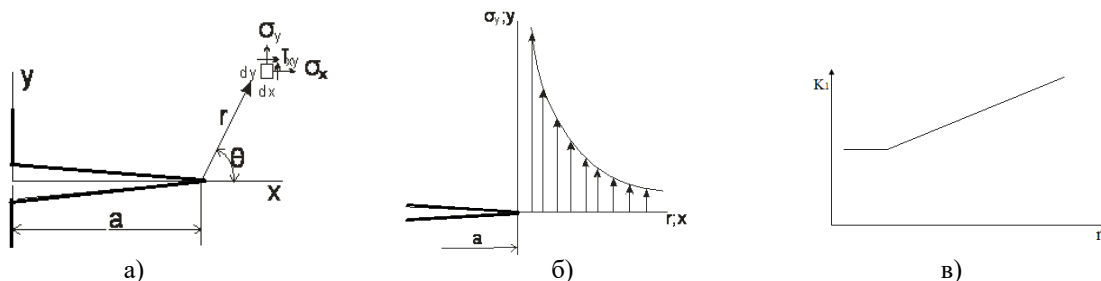


Рис. 2. Схематическое двухмерное изображение трещины нормального отрыва (а), асимптотический график напряжений вблизи вершины трещины (б) и график расчетных значений коэффициента интенсивности напряжений (г)

При решении упругой задачи о НДС у вершины трещины получаем бесконечное значение напряжений (рис. 2б). Формулы (1-3) являются асимптотическими и отображают НДС в малой локальной зоне вблизи вершины трещины. Значение КИН определяет величину перемещений, напряжений и деформаций в малой зоне вблизи фронта трещины. Считается, что различные трещины оказывают одинаковый разрушающий эффект, если значения КИН одинаковы.

Эту важнейшую характеристику (КИН) можно определить прямым модели-

рованием: определить численно (например по методу конечных элементов (МКЭ)) характеристики НДС у вершины трещины и затем вычислить КИН по любой из формул (1-3). Нами реализованы подобные прямые методы определения КИН [3-5] в сравнительно простых трехмерных деталях с одной и двумя [4] трещинами. При этом для вычисления КИН можно брать любую из точек, входящих в зону асимптоты (рис. 2б). На наш взгляд, целесообразно вычислять КИН в нескольких точках этой зоны. Стабильность значения КИН может являться критерием достаточной точности

решения задачи по определению соответствующего поля. А участок стабильного значения КИН является участком, в пределах которого локализуется возмущенное поле НДС у вершины трещины (рис. 2в). В промышленных программных пакетах реализованы такие методы определения КИН [6; 7]. Прямое моделирование НДС у вершины трещины возможно по двум расчетным схемам: трещину, расположенную в плоскости симметрии детали, можно моделировать как бесконечно-острый разрез; в более общих случаях трещина моделируется как разрез конечной ширины. Примеры таких вариантов моделирования приведены в наших статьях [3-5].

Поскольку зависимости для напряжений и перемещений у вершины трещины определенного типа при разных нагрузках отличаются только КИН, то возможно применение принципа суперпозиции решений, если общую нагрузку можно представить как сумму нескольких более простых нагрузок. Поэтому в случае СНС выражения для напряжений и перемещений у вершины трещины получают как суперпозицию выражений для трех типов нагружения трещин: растяжения, сдвига и среза (рис. 1а-в).

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \sum_{n=I}^{III} K_n f_{ijn}(\theta); \quad (4)$$

$$u_{ij} = \frac{2(1+\nu)}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sum_{n=I}^{III} K_n \varphi_{ijn}(\theta). \quad (5)$$

Таким образом, если разделить внешнюю нагрузку на три составляющие, соответствующие трем типам трещин (рис. 1а-в), то определить напряжения у вершины трещины не составляет труда. Обратную задачу – определение K_I , K_{II} и K_{III} по известному полю напряжений у вершины трещины – решить сложнее.

Назовем еще причины, из-за которых методы прямого моделирования применять не рационально. Так, в нашей монографии [8] охарактеризованы трещины, возникающие при контактном нагружении. Часто в зоне контактирования появляется большое количество различным образом ориентированных трещин, влияющих друг на друга. При прямом моделировании НДС в таких зонах необходимо использовать очень мелкую сетку конечных элементов (КЭ) практически во всей зоне. Трудоемкость решения задачи становится непомерно большой. Кроме того, размеры КЭ могут оказаться сопоставимыми с размерами компонентов структуры материала, и применимость гипотезы об однородности материала становится неочевидной. В таких случаях размеры КЭ должны быть достаточно большими, чтобы применять континуальные модели сплошной среды, и одновременно достаточно малыми, чтобы моделировать локальные поля НДС с высокими градиентами.

Применение сингулярных КЭ для моделирования НДС у вершины трещины

По сравнению с прямым моделированием НДС у вершины трещины более экономичными являются варианты использования КЭ с корневой особенностью у вершины трещины. Рассмотрим аппроксимацию перемещений в трехмерных двадцатиузловых конечных элементах [9; 10]. Перемещения в любой точке КЭ можно выразить через перемещения его узлов:

$$\{U(\{x_j\})\} = \sum_{i=1}^n N_i(\{x_j\}) \{q_i\}, \quad (6)$$

где $N_i(\{x_j\})$ – функции формы КЭ; $\{q_i\} = \{q_{1i} \dots q_{ni}\}$ – векторы узловых перемещений; n – число узлов элемента.

Вводятся криволинейные координаты $p_j (j=1 \dots m)$, которые являются безразмерными переменными, изменяющимися на отрезке $[-1; +1]$, причем экстремальные значения эти координаты имеют на границах элемента. На рис. 3а, б в качестве примера изображены прямоугольная и криволинейная системы координат, а также компоненты векторов поля перемещений и узловых степеней свободы произвольного по форме элемента объемного тела.

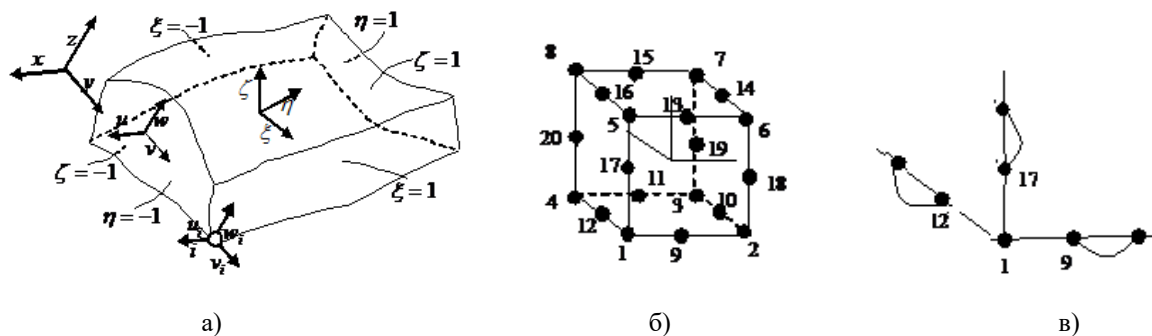


Рис. 3. Системы координат и перемещения в двадцатиузловом конечном элементе произвольной формы: а – глобальная, б – локальная; в - смещенные узлы в сингулярном конечном элементе

Каждая из функций формы $N_i (i = 1 \dots n)$ принимает значение, равное единице, в i -м узле и нулевые значения в остальных узлах элемента. Основное свойство этих функций заключается в их совместности, которая означает, что у элементов с общей границей перемещения во всех ее точках будут совпадать, так как узловые перемещения этих элементов одни и те же. Различают линейные (1-го порядка), квадратичные (2-го порядка), кубические (3-го порядка) КЭ - в зависимости от степени полинома, реализуемого в функциях формы.

Если в КЭ второго порядка средние узлы расположить не на середине кубика (как показано на рис. 3б), а сдвинуть их на $1/4$ стороны, то вблизи узла (узел №1 на рис. 3в) появится особая сингулярная зона [11; 12], такая же, как на графике 2б. Это довольно простой способ моделирования сингулярного поля напряжений у вершины трещины, и он реализован во многих промышленных программных пакетах [7; 8]. Но среди КЭ с сингулярным полем НДС наиболее эффективен, на наш взгляд, вариант применения гибридного КЭ [11].

Гибридный конечный элемент

На рис. 4 изображен фрагмент фронта трещины и примыкающие к нему гибридные КЭ четырех типов. Там же пока-

зана локальная система координат, связанная с фронтом трещины.

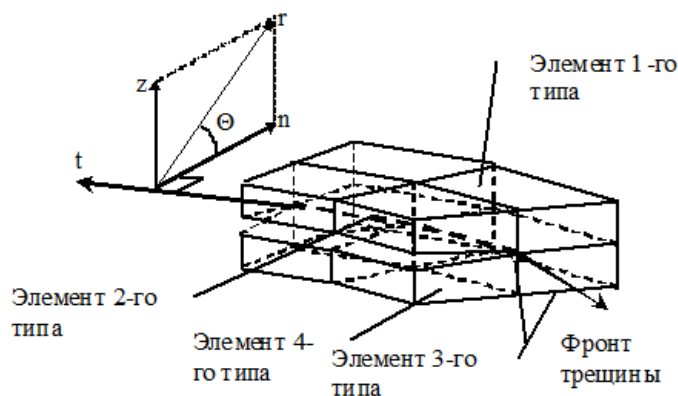


Рис. 4. Гибридные конечные элементы разных типов

Асимптотические решения, описывающие перемещения вблизи фронта трещины и соответствующие им сингулярные напряжения, выраженные в ортогональной

системе координат (n, t, z) , которая связана с фронтом трещины (изображен жирной пунктирной линией на рис. 4), выглядят следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} u_n \\ u_z \\ u_t \end{Bmatrix} = \frac{1}{G} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \begin{bmatrix} \frac{K_I}{8} \left[(5-8\nu) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{K_{II}}{8} \left[(9-8\nu) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \\ \frac{K_I}{8} \left[(7-8\nu) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) - \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + \frac{K_{II}}{8} \left[(-3+8\nu) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] \\ K_{III} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix} = U_s K; \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{nn} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{tt} \\ \sigma_{nz} \\ \sigma_{zt} \\ \sigma_{nt} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} K_I \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right) \\ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right) \\ 2\nu \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{bmatrix} + K_{II} \begin{bmatrix} -\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right) \\ \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ -2\nu \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right) \end{bmatrix} \\ K_I \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \sigma_s K. \quad (8)$$

Фактически формулы (7) и (8) являются конкретным видом формул (4) и (5) для системы координат (n, t, z) .

Гибридный метод допускаемых напряжений является вариантом построения матриц жесткости элементов, основанным на обобщении принципа минимума дополнительной энергии. Сущность этого метода состоит в задании уравновешенного поля напряжений $\{s\}$ внутри элемента через обобщенные параметры $\{\beta\}$ и $\{K\}$ с одновременным заданием совместного поля перемещений через узловые перемещения $\{q\}$.

Пусть перемещения на границе элемента определяются выражением

$$\tilde{u} = Lq. \quad (9)$$

Для этого заданного граничного перемещения нам необходимо определить поле напряжений внутри элемента, которое было бы уравновешенным и соответствовало бы совместному полю деформаций

$$\sigma_{rx} = [1 \quad y \quad z \quad y^2 \quad y \cdot z \quad z^2 \quad y^3 \quad y^2 \cdot z \quad y \cdot z^2 \quad z^3 \quad y^4 \quad y^3 \cdot z \quad y^2 \cdot z^2 \quad y \cdot z^3 \quad z^4].$$

Таким образом, используется полный полином четвертой степени. Для остальных компонент нормальных напряжений выражения аналогичны. Касательные

ций. Пусть поле напряжений внутри элемента задается в следующем виде:

$$\sigma = \sigma_r \beta + \sigma_s K, \quad (10)$$

где β - неопределенные параметры, а K - вектор коэффициентов интенсивности напряжений. Поле напряжений ss , определяемое формулами Ирвина (4), является уравновешенным и соответствует совместному полю деформаций. Для выражения $\sigma_r \beta$ также необходимо обеспечить выполнение зависимостей (8).

Для этого необходимо выполнение условий Ладыженской - Бабушки - Бреци [11], которые требуют, чтобы число параметров для двадцатиузловое элемента было 54. Выберем σ_r с учетом всех этих требований. Например, для компоненты σ_x выберем представление в виде полинома, включающего следующие степени декартовых координат:

напряжения аппроксимируются так: $\sigma_{r,xy} = [1 \quad z \quad z^2]$. Матрица σ_r выглядит следующим образом:

$$\sigma_r = \begin{bmatrix} \sigma_{rx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{ry} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{rz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{rxy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{rxz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{rzy} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Дополнительно необходимо учесть граничные условия на поверхности трещины:

$$n_j \sigma_{ij} = 0, \quad (12)$$

где n_j – направляющие косинусы.

Если на поверхности трещины отсутствуют напряжения, то нежелательно рассматривать (12) в качестве естественных граничных условий модифицированного принципа минимума дополнительной

энергии, так как это ухудшит точность. Необходимо обеспечить удовлетворение этих условий априори. Однако если усилия на поверхности трещины не нулевые, то можно оставить эти условия в качестве естественных граничных условий. Итак, если условия (12) удовлетворяются априори, функционал, представляющий дополнительную энергию, может быть записан таким образом:

$$\pi_c = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_r \beta + \sigma_s K)^T D^{-1} (\sigma_r \beta + \sigma_s K) dV - \int_S (\sigma_r \beta + \sigma_s K)^T \tilde{n} dS, \quad (13)$$

где n – матрица направляющих косинусов.

В соответствии с теоремой о дивергенции перепишем второе слагаемое выражения (13) через объемный интеграл:

$$\int_S (\sigma_r \beta + \sigma_s K)^T \tilde{n} dS = \int_V (\sigma_r \beta + \sigma_s K)^T B q dV. \quad (14)$$

Выполним упрощение выражения (13) с учетом (14), вводя следующие обозначения:

$$A_{rr} = \int_V \sigma_r^T D^{-1} \sigma_r dV; \quad A_{rs} = \int_V \sigma_r^T D^{-1} \sigma_s dV; \quad A_{ss} = \int_V \sigma_s^T D^{-1} \sigma_s dV; \quad A_{rB} = \int_V \sigma_r^T B dV; \\ A_{sB} = \int_V \sigma_s^T B dV.$$

Получаем:

$$\pi_c = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_r \beta + \sigma_s K)^T D^{-1} (\sigma_r \beta + \sigma_s K) dV - \int_V (\sigma_r \beta + \sigma_s K)^T B q dV = \\ = \frac{1}{2} \beta^T A_{rr} \beta + K^T A_{rs} \beta + \frac{1}{2} K^T A_{ss} K - \beta^T A_{rB} q - K^T A_{sB} q. \quad (15)$$

Дифференцируем (15) по β :

$$\frac{d\pi_c}{d\beta} = A_{rr} \beta + A_{rs} K - A_{rB} q = 0.$$

Получаем:

$$\beta = A_{rr}^{-1} (A_{rB} q - A_{rs} K). \quad (16)$$

Подставляем (16) в (15) и получаем:

$$\pi_c = \frac{1}{2} (q^T A_{Br} - K^T A_{sr}) A_{rr}^{-1T} A_{rr} A_{rr}^{-1} (A_{rB} q - A_{rs} K) + K^T A_{sr} A_{rr}^{-1} (A_{rB} q - A_{rs} K) + \\ + \frac{1}{2} K^T A_{ss} K - q^T A_{Br} A_{rr}^{-1} (A_{rB} q - A_{rs} K) - K^T A_{sB} q. \quad (17)$$

Дифференцируем (17) по q и K :

$$\begin{aligned} \frac{d\pi_c}{dq} &= A_{Br} A_{rr}^{-1} A_{rB} q - A_{Br} A_{rr}^{-1} A_{rs} K + A_{Br} A_{rr}^{-1} A_{rs} K - 2 A_{Br} A_{rr}^{-1} A_{rB} q + \\ &+ A_{Br} A_{rr}^{-1} A_{rs} K - A_{Bs} K = -A_{Br} A_{rr}^{-1} A_{rB} q + A_{Br} A_{rr}^{-1} A_{rs} K - A_{Bs} K; \\ \frac{d\pi_c}{dK} &= A_{sr} A_{rr}^{-1} A_{rB} q - A_{sB} q + A_{ss} K - A_{sr} A_{rr}^{-1} A_{rs} K. \end{aligned}$$

Получаем:

$$K_{11} = A_{Br} A_{rr}^{-1} A_{rB}; \quad (18)$$

$$K_{12} = -A_{Br} A_{rr}^{-1} A_{rs} + A_{Bs};$$

$$K_{21} = -A_{sr} A_{rr}^{-1} A_{rB} + A_{sB}; \quad (19)$$

$$K_{22} = -A_{ss} + A_{sr} A_{rr}^{-1} A_{rs}.$$

Формируем из (18) и (19) матрицу жесткости гибридного совместного КЭ:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Тестирование гибридного конечного элемента

Под руководством автора инженеры В.В.Лебков и С.Н.Осипов программно реализовали и протестировали такой КЭ [13; 14]. В качестве простейшего тестового примера была выбрана полоса со сквозной краевой трещиной (рис. 5). Полоса дискретизировалась двумя гибридными конечными элементами первого и второго типов

соответственно. Исследовалось напряженно-деформированное состояние полосы под воздействием равномерно распределенной нагрузки. Исходные данные следующие: $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; $\mu = 0,3$; $W = 2,5 \text{ мм}$; $H = 4 \text{ мм}$; $A = 2 \text{ мм}$; $q = 1000 \text{ Н/м}^2$.

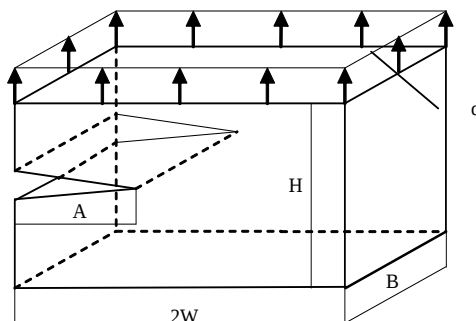


Рис. 5. Схема полосы с краевой трещиной

В результате расчета получили значение коэффициента интенсивности напряжений $K_I = 2,51 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Аналитическое значение для КИН в этой задаче взято из справочника [15], оно составляет $K_I = 2,47 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Таким образом, даже при использовании всего двух гибридных конечных элементов относительная погрешность составляет 1,33 %.

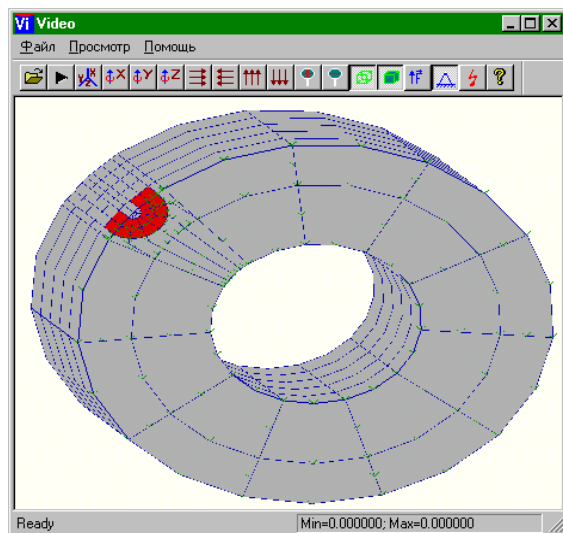
Этот подход применялся для определения КИН в двухслойном сталебаббитовом образце, используемом для исследования развития трещин в баббитовых слоях [16; 17]. Образец представляет собой двух-

слойную трубу. Внутренний радиус $r_0 = 3 \text{ мм}$, радиус стыка баббитового слоя и подложки $r_1 = 7 \text{ мм}$, внешний радиус баббитового слоя $r_2 = 9 \text{ мм}$. Длина рабочей части образца составляет 100 мм. Образец нагружался на стенде МУИ-6000 по схеме изгиба с вращением [16; 17]. Начальные трещины появлялись на поверхности баббитового слоя и имели полуэллиптическую форму.

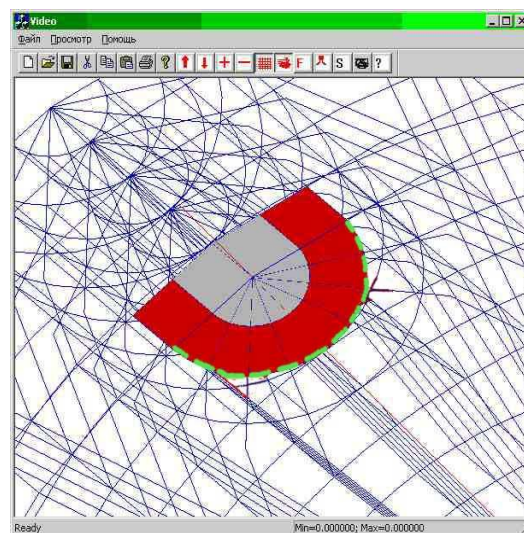
Для моделирования трещин в баббитовом слое осуществлялась авторазбивка [17] фрагмента образца с трещиной (рис. 6а). Полуэллиптическая трещина в бабби-

товом слое имеет один радиус, равный 0,8 мм, второй - 1,8 мм. Нагрузка, приложенная к объекту, вращается вокруг продольной оси образца, что необходимо для моделирования условия испытания. Фронт

трещины окружается гибридными элементами (рис. 6б). Так как образец имеет плоскость симметрии, то рассматривается его половина.



а)



б)

Рис. 6. Сетка конечных элементов для сталебаббитового образца стенда МУИ-6000 (а) и увеличенный фрагмент этой сетки вблизи фронта трещины (б)

Исходные данные:
 $E_{\text{подложки}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; $E_{\text{баббита}} = 0,6 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$;
 $\mu = 0,3$; $M_{\text{и}} = 1000 \text{ Нм}$.

Ранее были выполнены приближенные расчеты КИН [17]. Результаты расчетов сведены в таблицу, на основании которой построены графики зависимости $K_{I_{\text{max}}} / M$ от длины трещины (рис. 7). Все

данные приведены для случая, когда максимальные усилия действуют в плоскости, которая проходит через точку выхода трещины на поверхность образца. Изменяется только один радиус полуэллиптической трещины, второй остается постоянным и равен 1,8 мм.

Таблица

Результаты расчетов КИН

Радиус трещины $R_{\text{трещины}}, \text{ мм}$	Приближенное значение [17] $K_{I_{\text{max}}} / M, \text{ мм}^{-2,5}$	Расчетное значение $K_{I_{\text{max}}} / M, \text{ мм}^{-2,5}$	Относительная погрешность $\delta, \%$
0	0	0	0
0,1	0,290	0,282	2,75
0,2	0,506	0,501	0,98
0,3	0,642	0,658	2,49
0,4	0,725	0,76	4,82
0,6	0,9	0,985	9,4
0,8	1,0	1,113	13,3
1,0	1,112	1,212	8,99
1,2	1,165	1,23	5,57
1,5	1,204	1,315	9,21
1,8	1,25	1,324	5,92

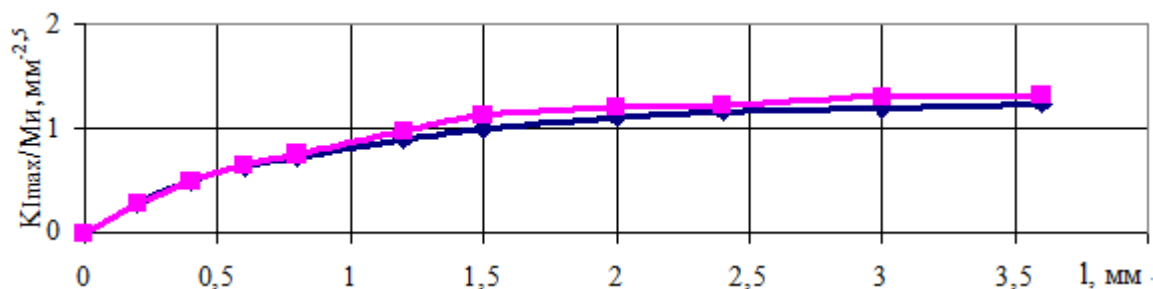


Рис. 7. Зависимость $K_{I_{max}} / M$ от длины l трещины образца для стэнда МУИ-6000 с размерами $r_0=3$ мм, $r_1=7$ мм, $r_2=9$ мм: —◆— - приближенное решение по [17]; —■— - МКЭ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение совместных гибридных конечных элементов позволяет рассчитывать детали с трехмерными де-

фектами произвольной формы с достаточной точностью при сравнительно крупных конечноэлементных сетках.

Выводы

Построен двадцатиузловой конечный элемент с гибридными аппроксимациями для моделирования сингулярных полей НДС у вершин трещин в трехмерных те-

лах. Тестовые примеры продемонстрировали эффективность применения такого конечного элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. - М.: Высш. шк., 1980. - 368 с.
- Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. - М.: Наука, 1974. - 640 с.
- Зернин, М.В. Трещиностойкость баббита Б83 / М.В. Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 1. - С. 91-101.
- Зернин, М.В. Напряженно-деформированное состояние баббитовых слоев с трещинами / М.В. Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 1. - С. 102-111.
- Зернин, М.В. Напряженное состояние в антифрикционном слое подшипника скольжения при наличии трещин / М.В. Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2017. - № 2. - С. 93-103.
- Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера / Е.М. Морозов. - М.: Ленанд, 2010. - 456 с.
- Рудаков, К.Н. UGS Femap 9.3. Геометрическое и конечноэлементное моделирование конструкций / К.Н. Рудаков. - М.: ДМК Пресс, 2009. - 296 с.
- Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. - 2-е изд. - М.: Либроком, 2010. - 544 с.
- Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: [пер. с англ.] / О. Зенкевич, К. Морган. - М.: Мир, 1986. - 318 с.
- Шабров, Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей / Н.Н. Шабров. - Л.: Машиностроение, 1983. - 212 с.
- Атлури, С. Вычислительные методы в механике разрушения: [пер. с англ.] / С. Атлури, Ф. Эрдоган, А. Кабаяси, Л. Фрэйи, М. Нагагаки, Т. Нисиока, Дж. Ньюман, И. Раджу. - М.: Мир, 1990. - 392 с.
- Сиратори, М. Вычислительная механика разрушения: [пер. с англ.] / М. Сиратори, Т. Миёси, Х. Мацусита. - М.: Мир, 1986. - 334 с.
- Лебков, В.В. Определение коэффициентов интенсивности напряжений методом конечных элементов / В.В. Лебков // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. Б.Г. Кеглина. - Брянск: БГТУ, 2002. - С. 107-112.
- Осипов, С.Н. Определение коэффициентов интенсивности напряжений методом гибридных конечных элементов / С.Н. Осипов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2007. - № 4. - С. 80-83.
- Мураками, М. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / М. Мураками. - М.: Мир, 1986. - 334 с.
- Кузьменко, А.Г. Закономерности развития трещин в баббитах / А.Г. Кузьменко, М.В. Зернин. - Брянск: БГТУ, 1983. - 83 с. - Деп. в ВИНТИ 9.09.83, № 5280-83.
- Зернин, М.В. Развитие независимых усталостных трещин в баббитовых слоях, нанесенных на подложку / М.В. Зернин // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: сб. науч. тр. / под ред. Б.Г. Кеглина. - Брянск: БИТМ, 1990. - С. 119-131.

1. Broyek, D. *Fundamental of Fracture Mechanics* / D. Broyek. – M.: Higher school, 1980. – pp. 368.
2. Cherepanov, G.P. *Brittle Failure Mechanics* / G.P. Cherepanov. – M.: Science, 1974. – pp. 640.
3. Zernin, M.V. Crack resistance of babbit B83 / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No. 1. – pp. 91-101.
4. Zernin, M.V. Stress-strain state of babbit layers with cracks / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No. 1. – pp. 102-111.
5. Zernin, M.V. Stress state in anti-friction layer of friction bearing at fracture presence / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No. 2. – pp. 93-103.
6. Morozov, E.M. *ANSYS in Engineer's Hands* / E.M. Morozov. – M.: Lenand, 2010. – pp. 456.
7. Rudakov, K.N. *UGS Femap 9.3. Geometrical and Finite Element Simulation of Structures* / K.N. Rudakov. – M.: DMK Press, 2009. – 2009. – pp. 296.
8. Morozov, E.M. *Contact Problems of Fracture Mechanics* / E.M. Morozov, M.V. Zernin. – 2-d Edition – M.: Librokom, 2010. – pp. 544.
9. Zenkevich, O. *Finite Elements and Approximation*: [transl. from Engl.] / O. Zenkevich, K. Morgan. – M.: Mir, 1986. – pp. 318.
10. Shabrov, N.N. *Finite Element Method in Parts Computation for Heat-Engines* / N.N. Shabrov. – L.: Mechanical Engineering, 1983. – pp. 212.
11. Atlury, S. *Computer Methods in Fracture Mechanics*: [transl. from Engl.] / S. Atlury, F. Erdogan, A. Kabayasi, L. Froen, M. Nagasaki. T. Nisioka, J. Newman, I. Radju. – M.: Mir, 1990. – pp. 392.
12. Siratori, M. *Computer Fracture Mechanics*: [transl. from Engl.] / M. Siratori, T. Miyosi, H. Matsushita. – M.: Mir, 1986. – pp. 334.
13. Lebkov, V.V. Definition of stress intensity factors by finite element method / V.V. Lebkov // *Dynamics, Strength and Reliability of Transport Vehicles: Proceedings* / under the editorship of B.G. Keglina. – Bryansk: BSTU, 2002. – pp. 107 -112.
14. Osipov, S.N. Definition of stress intensity factors by method of hybrid finite elements / S.N. Osipov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2007. – No. 4. – pp. 80-83.
15. Murakami, M. *Reference Book on Stress Intensity Factors* / M. Murakami. – M.: Mir, 1986. – pp. 334.
16. Kuzmenko, A.G. *Regularities in Fractures Development in Babbits* / A.G. Kuzmenko, M.V. Zernin. – Bryansk: BSTU, 1983. – pp. 83. – Dep. in VINI-TI 9.09.83, No. 5280-83.
17. Zernin, M.V. Development of independent fatigue cracks in babbit layers applied upon substrate /M.V. Zernin// *Dynamics, Strength and Reliability of Transport Vehicles: Proceedings* / under the editorship of B.G. Keglina. – Bryansk: BITM, 1990. – pp. 119-131.

Статья поступила в редколлегию 13.06.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Кеглин Б.Г.

Сведения об авторах:

Зернин Михаил Викторович, к.т.н., доцент кафедры «Информатика и программное обеспечение»

Zernin Mikhail Victorovich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Informatics and Software", Bryansk State Technical University, e-mail: zerninmv@mail.ru.

Брянского государственного технического университета, e-mail: zerninmv@mail.ru.

УДК 621.924

DOI: 10.12737/article_59cd7480e2b768.12100312

А.А. Никонов, А.Л. Каменева

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОГО РЕЗЦА И УНИВЕРСАЛЬНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИИ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ

Проанализирована проблема подготовки производства деталей нефтедобывающего оборудования с продольными винтовыми канавками в условиях постоянного изменения их типоразмеров, формы и номинальных размеров. Математически описана режущая кромка строгального резца заданного профиля. Разработана универсальная ме-

тодика расчета геометрии срезаемого слоя, позволяющая рассчитать геометрию срезаемого слоя для любого типоразмера канавок заданного профиля и для любого момента времени обработки.

Ключевые слова: механическая обработка, винтовые канавки, геометрия режущей кромки, геометрия срезаемого слоя.

A.A. Nikonov, A.L. Kameneva

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF COMPLEX CUTTER CUTTING EDGE AND UNIVERSAL PROCEDURE FOR GEOMETRY COMPUTATION OF LAYER CUT

A problem of the pre-production of parts for oil producing equipment with longitudinal helical grooves under conditions of constant changes of their type dimensions, a form and nominal dimensions is analyzed. A cutting edge of a planer tool with a specified profile is described mathematically. A universal procedure for the computation of the geometry of a layer cut allowing the geometry computation of a layer cut for any type dimension of grooves with a profile specified and for any moment of machining is developed.

A mathematical description of a cutting tool cutting edge allows carrying out a cutting edge geometry computation of a cutter with a specified profile on the basis of groove parameters and a pipe inner diameter.

A deduced system of parameter equations describes mathematically a cutting edge of a cutter for

machining a groove with a specified profile regardless of execution dimensions of a groove and an inner hole of the part worked.

It is established that the geometry of a layer cut at planning a groove at any moment may be described through nine schemes of a chip formation. The analytical model choice is carried out with the aid of the developed finders $fr(A)$, $fr(B)$. For all chip formation schemes there is obtained a mathematical description of the geometry of the layer cut.

The result may be used further for the automated computation of a cutter profile and for automated computation of optimum cutting modes.

Key words: machining, helical grooves, cutting edge geometry, geometry of layer cut.

Введение

В конструкциях нефтедобывающего оборудования применяется определенная

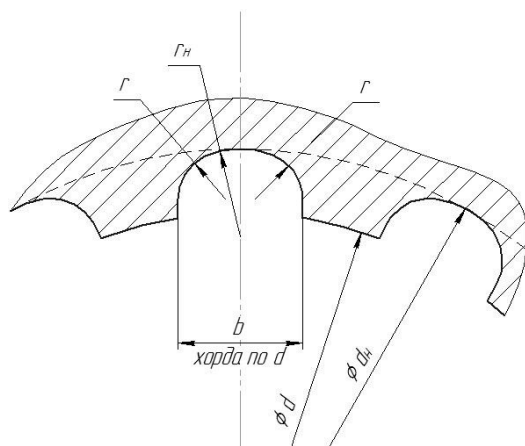


Рис. 1. Профиль канавки для протекания бурового раствора

группа деталей – толстостенные трубы или корпуса с продольными канавками по внутреннему отверстию детали (рис. 1) [1].

Наиболее часто канавки в деталях получают методом строгания сложнопровильным инструментом [2-4]. Постоянное изменение типоразмеров, формы и номинальных размеров канавок исходя из потребностей заказчика является актуальной проблемой для производства. Решению данной проблемы посвящен ряд работ [2; 3; 5-10]. Установлено, что сокращения циклов подготовки производства деталей возможно достичь путем:

- повышения скорости расчета геометрии режущей кромки сложнопрофильного режущего инструмента [5; 6];

- обобщения формул для расчета геометрии срезаемого слоя, используемых при определении оптимальных режимов резания [7-10].

Однако в публикациях не обнаружены расчетные формулы для решения рассматриваемой прикладной задачи.

Положения для расчета

При проведении расчетов приняты в качестве исходных данных следующие положения:

- форма канавок различных типоразмеров - см. рис. 1;
- угол винтовой направляющей канавки - τ ;
- передняя поверхность резца A_γ - плоская;
- профильный угол $\gamma_y \neq 0^\circ$;

В настоящей статье математически описана режущая кромка строгального резца заданного профиля и разработана методика расчета геометрии срезаемого слоя в любой момент времени и для любого типоразмера канавок заданного профиля.

- фронтальный угол $\gamma_x = 0^\circ$;

• режущая кромка – плоская кривая, форма которой определяется формой канавки.

Применяемые системы координат:

- система координат трубы (детали) - $X_m Y_m Z_m$ (рис. 2а);
- станочная система координат - XYZ (рис. 2б).

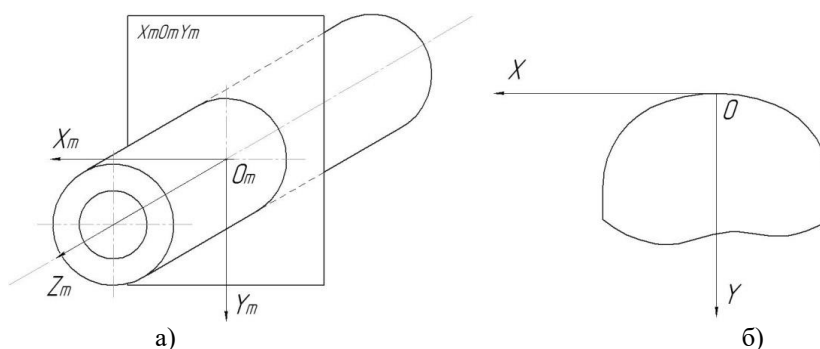
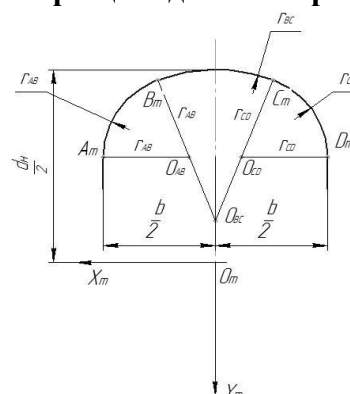


Рис. 2. Системы координат, применяемые в расчетах: а - система координат трубы (детали); б - станочная система координат

Математическое описание режущей кромки строгального резца заданного профиля

Изображая форму всех канавок заданного профиля на плоскости $X_m O_m Y_m$ системой дуг окружностей и отрезков, отображение режущей кромки на плоскости $X_m O_m Y_m$ можно представить системой трех дуг окружностей: $A_m B_m$, $B_m C_m$, $C_m D_m$ (рис. 3).



$$\begin{cases} (y_m + (\frac{d_n}{2} - r_{BC}))^2 + x_m^2 = r_{BC}^2, x_{Cm} \leq x_m \leq x_{Bm}; \\ (y_m + y_{mO_{AB}})^2 + (x_m - (\frac{b}{2} - r_{AB}))^2 = r_{AB}^2, x_{Bm} < x_m \leq x_{Am}; \\ (y_m + y_{mO_{CD}})^2 + (x_m + (\frac{b}{2} - r_{CD}))^2 = r_{CD}^2, x_{Dm} \leq x_m < x_{Cm}. \end{cases} \quad (1)$$

Ордината точки O_{AB} – $y_{mO_{AB}}$ определяется системой уравнений (2) исходя из следующих условий:

- по условию сопряжения дуг центр дуги A_mB_m – O_{AB} принадлежит прямой $O_{BC}B_m$;
- точки A_m и B_m принадлежат дуге $A_mB_m \Rightarrow A_mO_{AB} = B_mO_{AB} = r_{AB}$;

- точка A_m принадлежит прямой $x_m = \frac{b}{2} \Rightarrow$ точка O_{AB} принадлежит прямой $x_m = \frac{b}{2} - r_{AB}$;
- точка B_m принадлежит дуге $B_mC_m \Rightarrow O_{BC}B_m = r_{BC}$, а точка O_{AB} лежит на пересечении окружности с центром O_{BC} и радиусом $r_{BC} - r_{AB}$ с прямой $x_m = \frac{b}{2} - r_{AB}$.

$$\begin{cases} (y_m + (\frac{d_n}{2} - r_{BC}))^2 + x_m^2 = (r_{BC} - r_{AB})^2; \\ x_m = \frac{b}{2} - r_{AB}. \end{cases} \quad (2)$$

Определив из системы уравнений (2) ординату $y_{mO_{AB}}$ (3), коэффициент наклона прямой $O_{BC}B_m$ найдем из уравнения (4), искомые координаты точки сопряжения B_m

- из системы уравнений (5) и координаты точки сопряжения C_m - из системы уравнений (6):

$$y_{mO_{AB}} = y_{mO_{CD}} = r_{BC} - \sqrt{(r_{BC} - r_{AB})^2 - (\frac{b}{2} - r_{AB})^2} - \frac{d_n}{2}; \quad (3)$$

$$k = \frac{(y_{mO_{AB}} - (r_{BC} - \frac{d_n}{2}))}{(\frac{b}{2} - r_{AB})}; \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_{Bm} = r_{BC} * \cos(\arctg(k)); \\ y_{Bm} = r_{BC} * (1 + \sin(\arctg(k))) - \frac{d_n}{2}; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_{Cm} = -x_{Bm}; \\ y_{Cm} = y_{Bm}. \end{cases} \quad (6)$$

Отображением режущей кромки на плоскости XOY является проекция кривой $A_mB_mC_mD_m$ на основную плоскость P_v , что в станочной системе координат описы-

вается системой эллипсов (7) (для случая прямой канавки $\tau=0$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{(y-r_{BC})^2}{r_{BC}^2} + \frac{x^2}{r_{BC}^2 \cdot \cos^2 \tau} = 1, x_C \leq x \leq x_B; \\ \frac{(y+y_{OAB})^2}{r_{AB}^2} + \frac{(x-(\frac{b}{2}-r_{AB}))^2}{r_{AB}^2 \cdot \cos^2 \tau} = 1, x_B < x \leq x_A; \\ \frac{(y+y_{OCD})^2}{r_{CD}^2} + \frac{(x+(\frac{b}{2}-r_{CD}))^2}{r_{CD}^2 \cdot \cos^2 \tau} = 1, x_D \leq x < x_C. \end{array} \right. \quad (7)$$

$$y_{OAB} = y_{mOAB} + \frac{d_n}{2}; y_{OCD} = y_{OAB}.$$

$$\text{Здесь } x_A = x_{Am} \cos \tau; x_B = x_{Bm} \cos \tau;$$

$$x_C = x_{Cm} \cos \tau; x_D = x_{Dm} \cos \tau.$$

Зададим аналитическое уравнение режущей кромки в параметрическом виде (8). Тогда искомое уравнение режущей

кромки в станочной системе координат примет вид (9).

$$\left\{ \begin{array}{l} y = f(x); \\ z = \psi(x) = f(x) \operatorname{tg} \gamma_y. \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y = r_{BC} - \sqrt{r_{BC}^2 - \frac{x^2}{\cos^2 \tau}}, x_C \leq x \leq x_B; \\ z = \left(r_{BC} - \sqrt{r_{BC}^2 - \frac{x^2}{\cos^2 \tau}} \right) \operatorname{tg} \gamma_y, x_C \leq x \leq x_B; \\ y = y_{OAB} - \sqrt{r_{AB}^2 - \frac{(x-(\frac{b}{2}-r_{AB}))^2}{\cos^2 \tau}}, x_B < x \leq x_A; \\ z = \left(y_{OAB} - \sqrt{r_{AB}^2 - \frac{(x-(\frac{b}{2}-r_{AB}))^2}{\cos^2 \tau}} \right) \operatorname{tg} \gamma_y, x_B < x \leq x_A; \\ y = y_{OCD} - \sqrt{r_{CD}^2 - \frac{(x+(\frac{b}{2}-r_{CD}))^2}{\cos^2 \tau}}, x_D \leq x < x_C; \\ z = \left(y_{OCD} - \sqrt{r_{CD}^2 - \frac{(x+(\frac{b}{2}-r_{CD}))^2}{\cos^2 \tau}} \right) \operatorname{tg} \gamma_y, x_D \leq x < x_C. \end{array} \right. \quad (9)$$

Данная система параметрических уравнений математически описывает режущую кромку резца для обработки канавки заданного профиля вне зависимости

от исполнительных размеров канавки и внутреннего отверстия обрабатываемой детали.

Математическое описание геометрии срезаемого слоя

Если режущая кромка определена системой уравнений (8) и t – припуск на проход, то проекция предыдущего положения режущей кромки на плоскости XOY определяется функцией (10):

$$y = f(x) + t. \quad (10)$$

Срезаемый слой, ограниченный режущей кромкой и поверхностью, сформированной предыдущим проходом, а также поверхностью внутреннего отверстия обрабатываемой детали, образует сложную фигуру $MBSPKC_tB_tL$ (табл. 2).

Со сменой номера прохода i изменяются как площадь срезаемого слоя, так и условия резания. Тем не менее все возможные варианты сечения срезаемого слоя можно описать девятью схемами. В табл. 2 представлены схемы стружкообразования в зависимости от номера прохода i и припуска на проход t .

Если количество проходов N_t определяется из уравнения (11), то $i \in (1 \dots N_t)$.

$$N_t = \left\lceil \frac{(d_n - d)}{2t} \right\rceil. \quad (11)$$

Для быстрого выбора схемы стружкообразования, описывающей процесс в рассматриваемый момент времени, необходимо ввести определители (12) в виде функций от координат точек A и B :

$$\begin{aligned} fr(B) &= y_B - \left(\frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2}{4} - x_{Bm}^2} \right); \\ fr(A) &= y_A - \frac{d - \sqrt{d^2 - b^2}}{2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Сравнением значений $i t$ и $(i-1) t$ с определителями $fr(B)$, $fr(A)$ по табл. 1 однозначно определяется геометрия срезаемого слоя. В табл. 3 дополнительно к табл. 2 введены формулы для расчета координат узловых точек M , L , B_t , C_t , P , K , принадлежащих границе срезаемого слоя, в плоскости XOY (в зависимости от выбранной схемы стружкообразования).

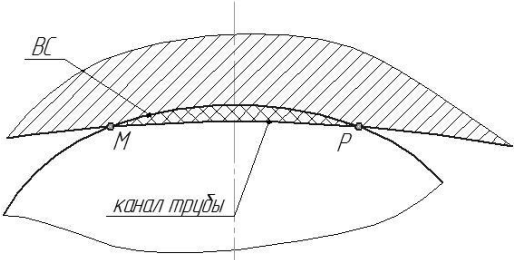
Таблица 1

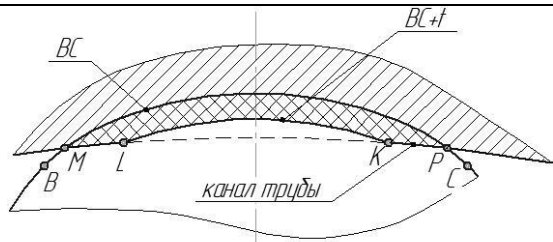
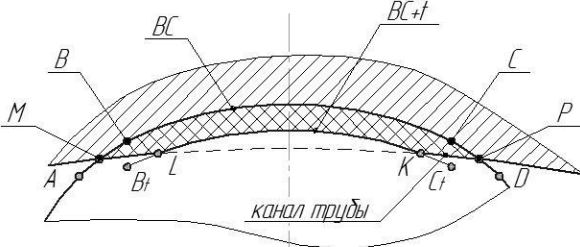
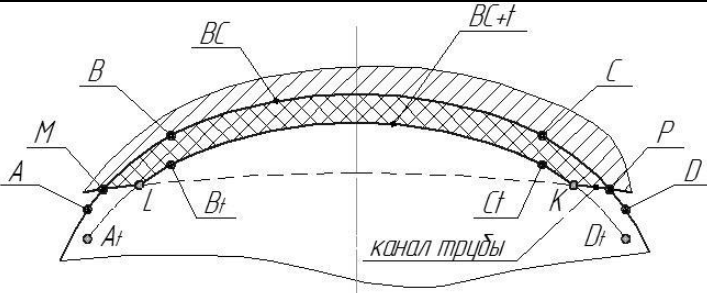
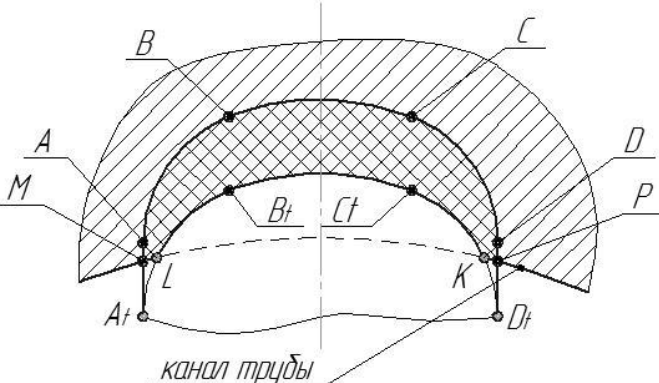
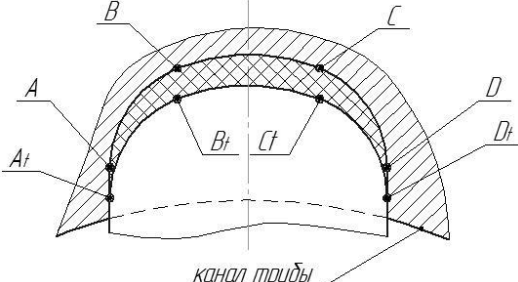
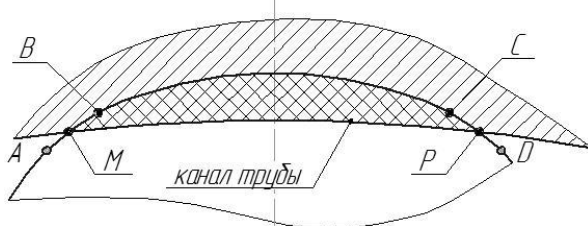
Определение схемы стружкообразования

		Текущее положение режущей кромки		
		$it \leq fr(B)$	$fr(B) \leq it \leq fr(A)$	$it \geq fr(A)$
Предшествующее положение режущей кромки	$i=1$	Сх.1	Сх.7	Сх.8
	$(i-1)t \leq fr(B)$	Сх.2	Сх.3	Сх.9
	$fr(B) \leq (i-1)t \leq fr(A)$	-	Сх.4	Сх.5
	$(i-1)t \geq fr(A)$	-	-	Сх.6

Таблица 2

Схемы стружкообразования при обработке канавок

№ схемы	Изображение	Координаты узловых точек (табл. 3)
1		$M - (13)$ $P - (14)$

2		M – (13) P – (14) L – (15) K – (16)
3		M – (17) P – (14) L – (15) K – (16)
4		M – (17) P – (14) L – (18) K – (16) B_t – (21) C_t – (22)
5		M – (19) P – (14) L – (18) K – (16) B_t – (21) C_t – (22)
6		A_t – (20) D_t – (23)
7		M – (17) P – (14)

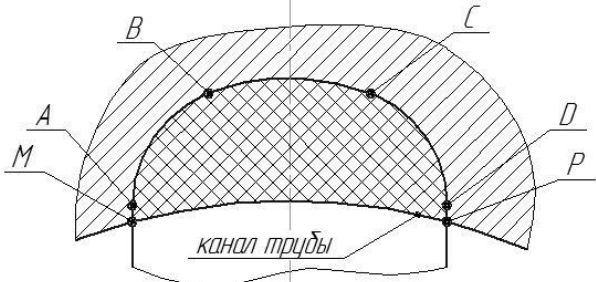
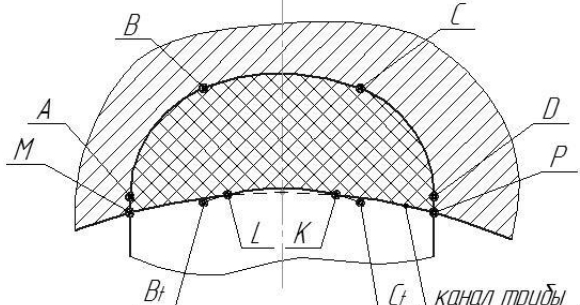
8		M – (19) P – (14)
9		M – (19) P – (14) L – (15) K – (16)

Таблица 3

Формулы для расчета координат узловых точек M, L, B_t, C_t, P, K

№ п/п	Условие	Формула
1	$\tau.M \in \cup BC$	$x_M = \left[\sqrt{\frac{d^2}{4} - \frac{\left(\left(r_{BC} - \frac{d}{2} - it \right)^2 + \frac{d^2}{4} - r_{BC}^2 \right)^2}{2 \left(r_{BC} - \frac{d}{2} - it \right)}} \right] \cos \tau,$ $y_M = \frac{\left(r_{BC} - \frac{d}{2} - it \right)^2 + \frac{d^2}{4} - r_{BC}^2}{2 \left(r_{BC} - \frac{d}{2} - it \right)} + \frac{d}{2} + it$ (13)
2	$\tau.P$	$x_P = -x_M,$ $y_P = y_M$ (14)
3	$\tau.L \in \cup B_t C_t$	$x_L = \left[\sqrt{\frac{d^2}{4} - \frac{\left(\left(r_{BC} - \frac{d}{2} - (i-1)t \right)^2 + \frac{d^2}{4} - r_{BC}^2 \right)^2}{2 \left(r_{BC} - \frac{d}{2} - (i-1)t \right)}} \right] \cos \tau,$ $y_L = \frac{\left(r_{BC} - \frac{d}{2} - (i-1)t \right)^2 + \frac{d^2}{4} - r_{BC}^2}{2 \left(r_{BC} - \frac{d}{2} - (i-1)t \right)} + \frac{d}{2} + it$ (15)
4	$\tau.K$	$x_K = -x_L,$ $y_K = y_L$ (16))

5	$T.M \in \cup AB$	$x_M = \left(\frac{a\phi + \sqrt{D}}{2(a^2 + v^2)} \right) \cos \tau,$ $z \partial e$ $a = \frac{b}{2} - r_{AB};$ $v = y_{mO_{AB}} + \frac{d_n - d}{2} - it;$ $\phi = \frac{d^2}{4} - r_{AB}^2 + a^2 + v^2;$ $D = (-a\phi)^2 - 4(a^2 + v^2) \left(\frac{\phi^2}{4} - v^2 \frac{d^2}{4} \right);$ $y_M = \frac{d}{2} + it - \sqrt{\frac{d^2}{4} - x_M^2}$	(17)
6	$T.L \in \cup A_t B_t$	$x_L = \left(\frac{a\phi + \sqrt{D}}{2(a^2 + v^2)} \right) \cos \tau,$ $z \partial e$ $a = \frac{b}{2} - r_{AB};$ $v = y_{mO_{AB}} + \frac{d_n - d}{2} - (i-1)t;$ $\phi = \frac{d^2}{4} - r_{AB}^2 + a^2 + v^2;$ $D = (-a\phi)^2 - 4(a^2 + v^2) \left(\frac{\phi^2}{4} - v^2 \frac{d^2}{4} \right);$ $y_L = \frac{d}{2} + it - \sqrt{\frac{d^2}{4} - x_L^2}$	(18)
7	$T.M \in -A$	$x_M = \frac{b}{2} \cos \tau,$ $y_M = \frac{d}{2} + it - \frac{\sqrt{d^2 - b^2}}{2}$	(19)
8	A_t	$x_{A_t} = x_A,$ $y_{A_t} = y_A + \frac{d_n}{2} + t$	(20)
9	B_t	$x_{B_t} = x_B,$ $y_{B_t} = y_B + \frac{d_n}{2} + t$	(21)
10	C_t	$x_{C_t} = -x_{B_t},$ $y_{C_t} = y_{B_t}$	(22)
11	D_t	$x_{D_t} = -x_{A_t},$ $y_{D_t} = y_{A_t}$	(23)

Заключение

Выведенная система параметрических уравнений математически описывает

режущую кромку резца для обработки канавки заданного профиля вне зависимости

от исполнительных размеров канавки и внутреннего отверстия обрабатываемой детали.

Математическое описание режущей кромки резца позволяет производить расчет геометрии режущей кромки резца заданного профиля на основании параметров канавки и внутреннего диаметра трубы.

Установлено, что геометрия срезаемого слоя при строгании канавки в любой момент времени может быть описана девя-

тью схемами стружкообразования. Выбор расчетной схемы осуществляется с помощью разработанных определителей $fr(A)$, $fr(B)$ (17). Для всех схем стружкообразования получено математическое описание геометрии срезаемого слоя (13-23).

Результаты могут быть использованы в дальнейшем для автоматизированного расчета профиля режущего инструмента и оптимальных режимов резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов, А.И. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин: учеб. для вузов / А.И. Булатов, Ю.М. Проселков, С.А. Шаманов. - М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. - 1007 с.
2. Макаров, В.Ф. Выбор и назначение оптимальных условий протягивания заготовок из труднообрабатываемых материалов: учеб. пособие / В.Ф. Макаров. - Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. - 396 с.
3. Жигалко, Н.И. Скоростное протягивание / Н.И. Жигалко. - Минск: Высш. шк., 1982. - 152 с.
4. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. - М.: Машиностроение, 1976. - 345 с.
5. Грановский, Г.И. Фасонные резцы / Г.И. Грановский, К.П. Панченко. - М.: Машиностроение, 1975. - 309 с.
6. Резников, Л.А. Проектирование сложнопрофильного режущего инструмента: электрон.

учеб. пособие / Л.А. Резников. - Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. - 208 с.

7. Исаев, А.И. Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием / А.И. Исаев. - М.: ЦНИИТМАШ, 1950. - Кн. 3. - 358 с.
8. Петрушин, С.И. Оптимальное проектирование формы режущей части лезвийных инструментов / С.И. Петрушин, И.М. Бобрович, М.А. Корчуганова. - Томск: Изд-во ТПУ, 1999. - 91 с.
9. Петрушин, С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами: учеб. пособие / С.И. Петрушин - Томск: Изд-во НТЛ, 2004. - 204 с.
10. Проскоков, А.В. Проектирование сменных многогранных пластин с равномерным износом вдоль режущей кромки: Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении / А.В. Проскоков. - Тюмень: Феликс, 2005. - С. 157-158.

1. Bulatov, A.I. *Engineering and Technology for Oil and Gas Well-boring: text book for colleges* / A.I. Bulatov, Yu.M. Proselkov, S.A. Shamanov. - M.: Interior-BusinessCenter, 2003. - pp. 1007.
2. Makarov, V.F. *Choice and Purpose of Optimum Conditions for Hard-to-Machine Blank Drawing: manual* / V.F. Makarov. - Perm: Publishing House of Perm State Technical University, 2008. - pp. 396.
3. Zhigalko, N.I. *Rapid Drawing* / N.I. Zhigalko. - Minsk: Higher School, 1982. - pp. 152.
4. Makarov, A.D. *Cutting Process Optimization* / A.D. Makarov. - M.: Mechanical Engineering, 1976. - pp. 345.
5. Granovsky, G.I. *Formers* / G.I. Granovsky, K.P. Panchenko. - M.: Mechanical Engineering, 1975. - pp. 309.
6. Reznikov, L.A. *Complex-shape Cutter Design at Metal Cutting* / electronic manual / L.A. Reznikov.

- Tollyatti: Publishing House of TSU, 2014. - pp. 208.

7. Isayev, A.I. *Process of Surface Layer Formation at Metal Cutting* / A.I. Isayev. - M.: CNIITMASH, 1950. Vol.3 - pp. 358.
8. Petrushin, S.I. *Optimum Design of Edge Tool Cutting Edge Form* / S.I. Petrushin, I.M. Bobrovich, M.A. Korchuganova. - Tomsk: Publishing House of TPU, 1999. - pp. 91.
9. Petrushin, S.I. *Shaping Fundamentals by Edge Tool Cutting: manual* / S.I. Petrushin - Tomsk: Publishing House of NTL, 2004. - pp. 204.
10. Proskokov, A.V. *Design of Replaceable Cutting Inserts with Even Wear Along Cutting Edge: New Materials, Nondestructive Check and Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / A.V. Proskokov. - Tyumen: Felix, 2005. - pp. 157-158.

Статья поступила в редколлегию 15.09.17.
Рецензент: д.т.н., профессор Московского
технологического университета
Албагачиев А.Ю.

Сведения об авторах:

Андрей Александрович Никонов, зам. гл. технолога ПАО «Мотовилихинские заводы», аспирант Пермского национального исследовательского политехнического университета, р.т. (342)260-74-34, д.т. 89120597239, e-mail: nikonov_aa@mz.perm.ru.

Andrey Petrovich Nikonov, Deputy Chief-Technologist PPC “Motovilikhinsky Plants”, Post graduate student, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: nikonov_aa@mz.perm.ru.

Анна Львовна Каменева, д.т.н., доцент, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета, р.т. (342)2391508, д.т. (342)2242405, e-mail: annkam789//2mail.ru.

Anna Lvovna Kameneva, D. Eng., Assistant Prof., Prof. of Perm National Research Polytechnic University, e-mail: annkam789//2mail.ru.

УДК 621.9

DOI: 10.12737/article_59cd770a54bdc3.16158240

М.Ю. Куликов, М.В. Ягодкин

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗЬБОНАРЕЗАНИЯ В ОТВЕРСТИЯХ СВЕРХМАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Рассмотрены особенности процесса резьбонарезания в отверстиях сверхмалого диаметра ($d \leq 1,4$), влияние диаметра на закономерности обработки и стружкообразования. Выявлены причины низкой надёжности резьбонарезания и пути ее повышения.

Ключевые слова: нарезание резьбы, сверхмалый диаметр, тонкое точение, сечение стружки, формирование момента резания.

M.Yu. Kulikov, M.V. Yagodkin

RELIABILITY INCREASE OF THREAD CUTTING IN SUPERSMALL HOLES

The paper reports the peculiarities of thread cutting in holes of super-small diameter ($d \leq 1.4$), the impact of a diameter upon regularities of machining and chip formation. The reasons of low thread cutting reliability and the ways for its increase are revealed.

Key words: thread cutting, super-small diameter, fine turning, chip section, cutting moment formation.

В современном машиностроении нарезание резьбы метчиками является сложной технологической проблемой из-за поломок метчиков, приводящих к возникновению брака [1]. Эта проблема усугубляется при нарезании резьбы в отверстиях сверхмалых диаметров ($d \leq 1,4$). Трудности обусловлены пониженной прочностью инструмента, сложностью подвода смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону резания и отвода из нее образовавшейся стружки. В работе [2] установлено, что количество отказов метчиков увеличивается с увеличением длины нарезаемой резьбы и достигает до 80%, а при реверсе - до 40%. Исходя из этого на промышленных предприятиях для предотвращения

брака резьбу в сверхмалых отверстиях нарезают вручную работники высокой квалификации.

Целью данной работы является разработка способов повышения надёжности процесса резьбонарезания на станках в отверстиях сверхмалого диаметра в деталях из алюминиевых сплавов.

Исследования проводились при нарезании резьбы М1,4х0,3 в отверстиях деталей из алюминиевых сплавов А13, АМг6, Д16. Использовались стандартные метчики М1,4х0,3 с тремя стружечными канавками и углом подъёма заборного конуса 14 град, изготовленные из быстрорежущей стали Р6М5, Р18. Обработка производилась на обрабатывающем центре с ЧПУ SP32215.

В процессе нарезания контролировали возникающий момент резания. Результаты показаны на рис. 1. Их анализ свидетельствует о том, что возникающий в процессе резания момент растёт от нуля до максимального допустимого значения на 0,8-1,2 мм длины обрабатываемого отверстия. Дальнейшая обработка приводит к заклиниванию и поломке метчика, поэтому необходимо проводить реверс. При этом возникает обратный момент, численно равный или более высокий, чем при прямом ходе. При реверсе также существует вероятность поломки метчика, связанная с

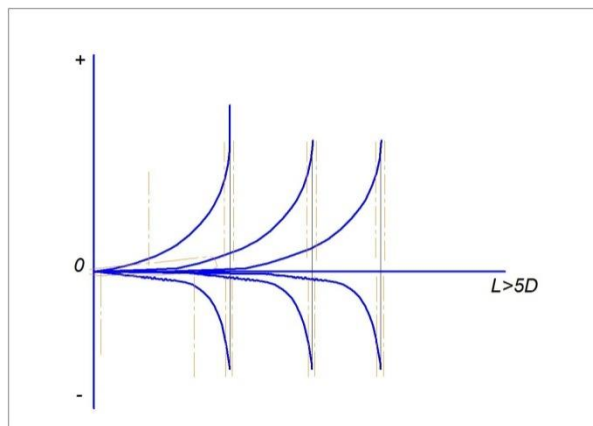


Рис. 1. Изменение момента по длине нарезаемого отверстия для малых резьб (М0,8-М1,4)

подминанием стружки [3]. Затем цикл повторяется.

Таким образом, для обеспечения нормального процесса цикл резбонарезания состоит из рабочего хода, связанного с нарезанием резьбы, и реверса, необходимого для удаления образовавшейся стружки. При нарезании резьбы М5-М12 изменение момента идёт по зависимости, показанной на рис. 2. В этом случае момент увеличивается на участке врезания и уменьшается на участке выхода метчика из отверстия. В процессе нарезания резьбы величина момента резко (как на рис. 1) не изменяется.

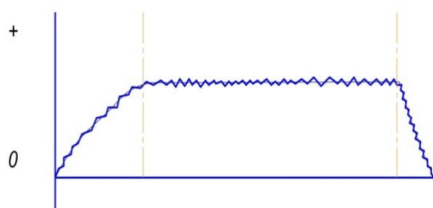


Рис. 2. Изменение момента по длине нарезаемого отверстия для крупных резьб (М5-М12)

Существование циклов «рабочий ход - реверс» при нарезании сверхмалых резьб связано с ухудшением возможности удаления стружки, образование которой приводит к заклиниванию метчика. Подбор специальных СОЖ и использование инструмента с твёрдыми покрытиями не обеспечивают улучшения условий удаления стружки из зоны обработки.

Проведенные исследования [5] показали, что процесс резания состоит из двух составляющих: 1) непосредственно процесс резания, т.е. отделение стружки; 2) упругопластическое поднимание слоя обрабатываемого материала. Как указывалось в работе [6], при точении с параметрами сечения срезаемого слоя, соизмеримыми с радиусом округления режущей кромки инструмента, происходит изменение фактических значений углов в зоне резания, что существенно влияет на всю систему действующих сил и условий стружкообразования.

Также в ряде работ приводятся фотографии корней стружки, полученной тонким точением, с характерным образованием

застойной зоны и отмечается, что она практически уменьшает отрицательный фактический передний угол, а элемент стружки начинается на некотором расстоянии от режущей кромки [7].

В работе [8] была показана высокочастотная микросъёмка зоны резания по данным Епоного Н.Е., Oxley P.L. (рис. 3).

На схеме отчётливо видны застойная зона и участок, в котором металл проминается под действием режущего инструмента, приводя к затиранию задней части режущего клина, что, в свою очередь, из-за большой длины контакта [5] и низкой жесткости инструмента значительно усложняет процесс резания.

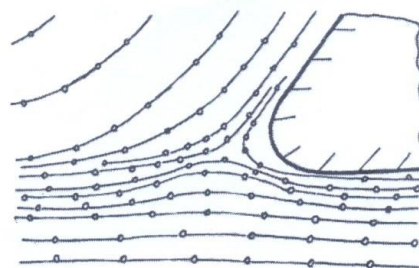


Рис. 3. Высокочастотная микросъёмка зоны резания углеродистой стали – СТМ [8]

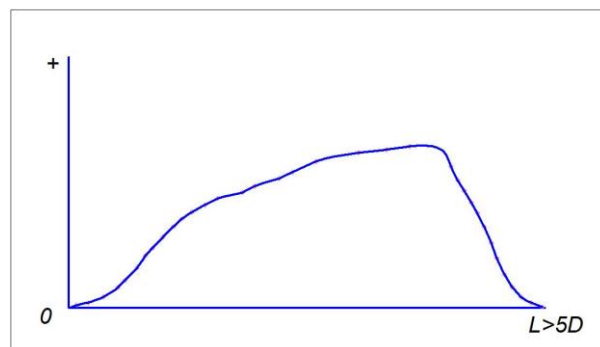


Рис. 4. Изменение момента по длине нарезаемого отверстия для малых резьб (М0,8-М1,4) при применении АМО

Также проведенные исследования [5] позволили установить, что при нарезании резьбы сверхмалых диаметров происходит ужесточение условий обработки и возникновение изгибающих усилий на обрабатываемом метчике.

Для улучшения условий удаления стружки при нарезании резьбы метчиками был использован процесс лезвийной анодно-механической обработки (АМО), совмещающий механическое и электрохимическое воздействие на удаленную стружку. Зависимость возникающего момента резания от длины нарезаемой резьбы в условиях анодно-механической обработки показана на рис. 4. Полученная зависимость аналогична зависимости, показанной на рис. 2. Она косвенно свидетельствует о

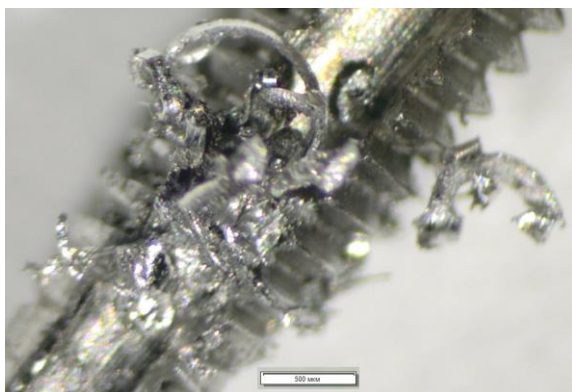


Рис. 5. Объем стружки при обработке традиционным способом

том, что образовавшаяся стружка уже не приводит к заклиниванию метчиков при резбонарезании. Об уменьшении интенсивности стружкообразования и улучшении условий удаления стружки свидетельствует сравнение рис. 5 и 6. Видно, что объем стружки, остающейся в стружечной канавке метчика, после АМО (рис. 6) значительно меньше, чем после традиционной обработки в среде СОЖ (рис. 5).

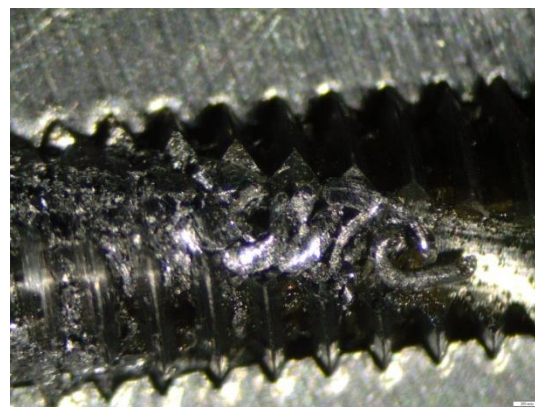


Рис. 6. Объем стружки при использовании АМО

При применении АМО в процессе резбонарезания в отверстиях сверхмалого диаметра уменьшается количество поломок метчиков на длину $L=6$ мм, количество реверсов (до 1); количество отказов (поломок) метчиков уменьшается до 10%, а при реверсе они практически не наблюдаются.

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Основной причиной брака является заклинивание инструмента вследствие плохого отвода стружки из зоны резания.
2. При нарезании резьбы малого диаметра требуется выполнить несколько циклов рабочих ходов и реверсов для нарезания резьбы на всей длине отверстия.
3. Применение лезвийной анодно-механической обработки позволяет значительно снизить объем стружки, остающейся в стружечной канавке в процессе обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толмачёв, С.А. Повышение надёжности работы метчиков при нарезании резьб в глухих отверстиях стальных деталей: дис. ... канд. техн. наук / С.А. Толмачёв. - М., 2001. - 143 с.
2. Куликов, М.Ю. Исследования надёжности процесса резбонарезания в отверстиях сверхмалого диаметра / М.Ю. Куликов, М.В. Ягодкин // Известия КБГУ. - 2015. - № 5. - С. 153-156.
3. Головкин, В.В. Нарезание резьбы метчиками в глухих отверстиях деталей из труднообрабатываемых материалов с применением ультразвуковых колебаний / В.В. Головкин, М.В. Дружинина // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2013. - Вып. 6. - Ч. 1. - С. 57-64.
4. Myo Naing Oo. Technological method for finishing process of fusible alloy / M.Yu. Kulikov, V.E. Inozemtsev, Myo Naing Oo // Precision Machining VII. Selected, peer reviewed papers from the 7th International Congress of Precision Machining (ICPM 2013). - Miskolc, Hungary, 2013. - P. 224-228.
5. Куликов, М.Ю. Особенности процесса резбонарезания в отверстиях сверхмалых диаметров / М.Ю. Куликов, М.В. Ягодкин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 3. - С. 153-156.
6. Рыкунов, А.Н. Теплофизический анализ лезвийной обработки с малыми толщинами среза /

- А.Н. Рыкунов // Вестник ВВО АТН РФ. - Рыбинск: РГАТА, 2010. - № 1. - С. 128-134.
7. Волков, Д.И. Повышение производительности и качества деталей ГТД при обработке методом глубинного шлифования: дис. ... канд. техн. наук / Д.И. Волков. - Андропов, 1987. - 221 с.
1. Tolmachyov, S.A. *Reliability Increase in Tap Operation at Thread Cutting in Blind Holes of Steel Parts*: Can. of Eng. Thesis / S.A. Tolmachyov. - M., 2001. - pp. 143.
2. Kulikov, M.Yu. Investigations of thread cutting reliability in super-small holes / M.Yu. Kulikov, M.V. Yagodkin // *Proceedings of KBSU*. - 2015. - No. 5. - pp. 153-156.
3. Golovkin, V.V. Thread cutting with taps in blind holes of hard-to-machine materials using super-sonic oscillations / V.V. Golovkin, M.V. Druzhinina // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences*. - 2013. - Edition 6 - Part 1. - pp. 57-64.
4. Myo Naing Oo. Technological method for finishing process of fusible alloy / M.Yu. Kulikov, V.E. Inozemtsev, Myo Naing Oo // *Precision Machining VII. Selected, peer reviewed papers from the 7th International Congress of Precision Machining (ICPM 2013)*. - Miskolc, Hungary, 2013. - P. 224-228.
5. Kulikov, M.Yu. Thread cutting peculiarities in super-small holes / M.Yu. Kulikov, M.V. Yagodkin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2016. - No. 3. - pp. 153-156.
6. Rykunov, A.N. Thermal physical analysis of cutting edge machining with small cut thickness / A.N. Rykunov // *Bulletin of VVO ATN of the RF*. - Rybinsk: RSATA, 2010. - No. 1. - pp. 128-134.
7. Volkov, D.I. *Efficiency and Quality Increase of HTE Parts at Machining with Deep Grinding Method*: Can. Eng. Thesis / D.I. Volkov. - Андропов, 1987. - pp. 221.
8. Leonov, B.N. *Thermo-contact Phenomena Investigation at Metal Fine Turning with Hard-Alloy and cBN Cutters*: Can. Eng. Thesis / B.N. Leonov. - Kuibyshev, 1974. - pp. 172.

Статья поступила в редколлегию 13.09.17.

Рецензент: д.т.н., профессор
Шентунов С.А.

Сведения об авторах:

Куликов Михаил Юрьевич, д.т.н., профессор Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II, e-mail: muk.56@mail.ru.

Kulikov Mikhail Yurievich, D. Eng., Prof. of Emperor Nikolay the II State Communication University of Moscow, e-mail: muk.56@mail.ru.

Ягодкин Максим Викторович, аспирант Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: yagodkin.maksim.513@mail.ru.

Yagodkin Maxim Victorovich, Post graduate student of the Institute of Design Technological Informatics of RAS, e-mail: yagodkin.maksim.513@mail.ru.

УДК 621.9

DOI: 10.12737/article_59cd769d871dd9.90790664

М.Ю. Куликов, А.Ю. Попов, Д.В. Волков

РЕАЛИЗАЦИЯ РОТАЦИОННОГО ТОЧЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Описано устройство для ротационного точения с принудительным приводом инструмента, обеспечивающее быструю наладку оборудования в производственных условиях при точении деталей из аустенитной стали 12Х18Н10Т. Показаны значительные преимущества этого вида обработки по сравнению с обычным точением и ротационным

резанием с самовращающимися резцами. Используются следующие методы исследования: эмпирические методы, эксперимент, метод наблюдения.

Ключевые слова: резание металлов, режущий инструмент, ротационное точение, ротационный резец.

M.Yu. Kulikov, A.Yu. Popov, D.V. Volkov

ROTARY TURNING REALIZATION UNDER PRODUCTION CONDITIONS

The paper reports the description of the device for rotary turning with tool forced drive ensuring a quick equipment setup under production conditions at turning parts made of austenite steel 12H18N10T. Significant advantages of this kind of machining in comparison with common turning and rotary cutting with self-rotating cutters are shown. The following methods of investigations are used: "rule-of-thumb" methods, experiment, observation methods.

Practical tests carried out have shown a possibility of developed device use for rotary turning at roughing and semi-finishing long shafts and axles. Furthermore, a stepped shaft semi-finishing by a chosen way is possible, but with the further additional finishing.

Radial forces at a small cutting depth and a cutting temperature at rotary turning are considerably

lower than at turning with prismatic cutters. It allows not only increasing a processing speed, but decreases considerably a blank deformation.

According to results of tests carried out at further investigations it is supposed to be concentrated upon the solution of two basic problems:

1) the study of problems taken place at rotary turning and deduction of a dependence of ratios of a cutting speed and a frequency of cutting plate rotation at different feeds;

2) the study of cutter operation modes at the element chip transition into the continuous one.

Key words: metal cutting, cutter, rotary turning, rotary cutter.

Одним из эффективных методов повышения производительности механической обработки является использование ротационного точения.

Суть метода заключается в замене традиционного трения скольжения между рабочими поверхностями режущего элемента и обрабатываемым материалом трением качения. Это достигается оснащением ротационного инструмента вращающейся чашкой, у которой режущая кромка имеет форму окружности, что позволяет осуществить ее непрерывное дополнительное вращение вокруг собственной оси. Благодаря большой длине круговой режущей кромки лезвия, непрерывному вращению его во время работы, обеспечивающему прерывистость и кратковременность работы каждого его участка, хорошим условиям охлаждения лезвия за время хо-

лового пробега и значительно меньшей истинной скорости резания по сравнению со скоростью главного движения температура в зоне резания при обработке ротационным инструментом по сравнению с традиционным инструментом снижается до 40%.

Отмеченное снижение температуры резания, небольшой линейный износ, который не накапливается, как в обычном инструменте, на одном неподвижном участке лезвия, а равномерно распределяется по всей его длине, хорошие условия теплоотвода от работающих участков лезвия в режущую чашку, имеющую большой радиус кривизны, уменьшение сил трения между рабочими поверхностями инструмента и обрабатываемым материалом обеспечивают повышение стойкости ротационных режущих инструментов в десятки

раз по сравнению с традиционными инструментами при одновременном повышении режимов резания [3].

Основные особенности ротационного точения отражены в работах Е.Г. Коновалова, А.Е. Адама, И.С. Кушнера, Д.Е. Иерусалимского, П.И. Ящерицына и других. Основная масса применяемых на сегодняшний день резцов - это самовращающиеся резцы, расположенные под некоторым углом к оси вращения. Динамика их вращения основана на силе трения. Количество имеющихся ротационных резцов с принудительным вращением незначительно, так как имеются трудности с выбором подходящего по мощности и габаритным размерам привода ротационного инструмента.

Несмотря на большое количество литературы по ротационному точению, на практике указанный способ обработки с принудительным вращением режущей пластины практически не используется. Это связано со сложностью конструкции устройства, обеспечивающего вращение инструмента. Однако именно принудительное вращение режущего инструмента дает наибольший эффект. При принудительном вращении отсутствуют проскаль-

зывания, которые наблюдаются у самовращающегося ротационного резца из-за засаливания и неоднородности материала заготовки, что приводит к локальному износу режущей кромки режущей пластины.

Для упрощения использования ротационного резания в конкретных производственных условиях было разработано приспособление для ротационного точения с принудительным приводом. В качестве привода был использован двигатель постоянного тока 48 В мощностью 0,4 кВт. На блоке управления установлен потенциометр для регулирования скорости вращения двигателя от 0 до 24000 об/мин. Вращение передается на ось (шпиндель) режущей пластины червячной парой с передаточным отношением 1:30. Таким образом, максимальная частота вращения режущей пластины - 800 об/мин. Сам шпиндель крепится на двух радиально-упорных конических роликовых подшипниках. В качестве инструмента используется режущая пластина чашечного типа RCMX1606MOYBM251. Приспособление крепится державкой в резцедержателе токарного станка. Плоскость режущей кромки располагается на уровне линии центров станка (рисунок).

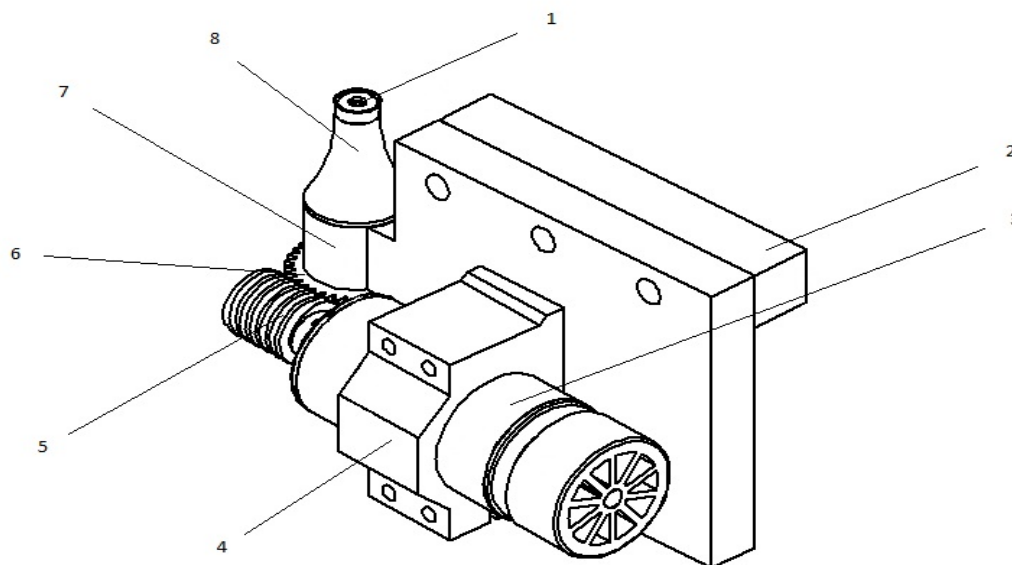


Рис. Ротационный резец с принудительным приводом:

- 1 - режущая пластина; 2 - державка; 3 - электродвигатель; 4 - кронштейн электродвигателя;
5 - червячный вал; 6 - червячная шестерня; 7 - подшипниковый узел; 8 - шпиндель

Был проведен ряд экспериментов по обработке деталей типа тел вращения. Эксперименты проводились на заготовках из аустенитной стали 12X18H10T без применения смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС).

Целью данных исследований был поиск возможностей увеличения скорости обработки и стойкости режущего инструмента при сохранении требуемой точности и шероховатости поверхности детали при обработке нержавеющей сталей без применения СОТС.

Главными условиями, влияющими на точность выполнения размеров детали и ее шероховатость, являются:

- точность исполнения шпинделя и подшипникового узла в целом;
- отсутствие радиального и осевого биения шпинделя;
- точность центровки режущей пластины;
- статическая и динамическая жесткость станочного оборудования.

Любые погрешности, связанные с выполнением указанных условий, оказывают влияние на обработанную поверхность. Увеличивается шероховатость, и появляется так называемая волнистость, которая периодически повторяется в зависимости от скоростей вращения обрабатываемой детали и режущей пластины, а также от величины подачи. Так, при биении режущей пластины с увеличением глубины резания высота волны возрастает. По высоте волны различаются незначительно.

При обработке стали 12X18H10T обычными призматическими резцами наблюдается сход сливной стружки, что неблагоприятно как для обрабатываемой детали, так и для безопасности оператора станка. Практические опыты ротационного точения показали сход элементной стружки желтого цвета в процессе обтачивания, что свидетельствует о хорошем отводе основного тепла в стружку. Сход элементной стружки обусловлен тем, что при высоких скоростях резания растет сила трения и,

как следствие, температура резания, которая способствует образованию нароста. При смене контактной точки ротационного резца в зоне резания происходит снижение температуры и отрыв нароста. При снижении скорости вращения режущей пластины наблюдается увеличение размеров элементов стружки, а при скорости вращения менее 100 об/мин элементная стружка переходит в сливную.

При увеличении скорости резания и снижении скорости вращения режущей пластины наблюдается уменьшение шероховатости поверхности точения. Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке 1М62. Максимальная скорость резания, при которой проводились эксперименты, - 250 м/мин. Указанное ограничение в работе станка не позволило добиться желаемых результатов обработки в части снижения шероховатости.

Проведенные практические опыты показали возможность использования разработанного приспособления для ротационного точения при черновой и получистовой обработке длинных валов и осей. Кроме того, возможна получистовая обработка ступенчатых валов выбранным способом, но с последующей дополнительной чистовой обработкой.

Радиальные силы при малой глубине резания и температура резания при ротационном точении значительно ниже, чем при точении призматическими резцами. Это не только позволяет увеличить скорость обработки, но и значительно снижает деформацию заготовки.

По результатам проведенных опытов планируется при дальнейших исследованиях сконцентрироваться на решении двух основных задач:

1. Изучение процессов, происходящих при ротационном точении, и выведение зависимости отношений скорости резания и частоты вращения режущей пластины при разных величинах подачи.

2. Изучение режимов работы резца при переходе элементной стружки в сливную.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов, Е.Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко, А.В. Соусь. - Минск: Наука и техника, 1972. - 272 с.
2. Гик, Л.А. Ротационное резание металлов / Л.А. Гик. - Калининград: Кн. изд-во, 1990. - 254 с.
3. Ящерицын, П.И. Ротационное резание материалов / П.И. Ящерицын, А.В. Борисенко, И.Г. Дривотин, В.Я. Лебедев. - Минск, 1987. - 229 с.
4. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов: учеб. пособие для вузов / В.Н. Подураев. - М.: Высш. шк., 1974. - 587 с.
1. Konovalov, E.G. Efficient circuits of rotary metal cutting / E.G. Konovalov, V.A. Sidorenko, A.V. Sous. - Minsk: *Science and Engineering*, 1972. - pp. 272.
2. Gik, L.A. *Rotary Metal Cutting* / L.A. Gik. - Kaliningrad: Book Publishing House, 1990. - pp. 254.
3. Yashcheritsyn, P.I. *Rotary Material Cutting* / P.I. Yashcheritsyn, A.V. Borisenko, I.G. Drivotin, V.Ya. Lebedev. - Minsk, 1987. - pp. 229.
4. Podurayev, V.N. *Hard-to-Machine Material Cutting: manual for colleges* / V.N. Podutayev. - M.: Higher School, 1974. - pp. 587.

Статья поступила в редколлегию 13.09.17.

Рецензент: д.т.н., профессор
Шентунов С.А.

Сведения об авторах:

Куликов Михаил Юрьевич, д.т.н., профессор Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: muk.56@mail.ru.

Попов Алексей Юрьевич, к.т.н., доцент кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского универ-

ситета транспорта (МИИТ), e-mail: madrat@inbox.ru.

Волков Дмитрий Валентинович, зав. лаб. кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта (МИИТ), e-mail: dvvolkov@list.ru.

Kulikov Mikhail Yurievich, D. Eng., Prof, Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: muk.56@mail.ru.

Popov Alexey Yurievich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Technology of Transport Engineering and

Rolling-Stock Repair", Russian University of Communication (MIET), e-mail: madrat@inbox.ru.

Volkov Dmitry Valentinovich, Head of the Lab. of the Dep. "Technology of Transport Engineering and Rolling-Stock Repair" (MIET), e-mail: dvvolkov@list.ru.

УДК 621.923.6

DOI: 10.12737/article_59cd768176efe4.43678555

В.А. Панайоти

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПРИ ШЛИФОВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОК

Рассмотрено влияние твердой смазки на температурный процесс при шлифовании различных марок быстрорежущей стали эльборовыми кругами. Выявлены закономерности изменения контактной температуры при обработке на различных режимах резания и представлены эмпирические зависимости, что позволяет обоснованно

назначать условия обработки. Показана эффективность применения твердой смазки и даны рекомендации для ее эффективного применения.

Ключевые слова: твердая смазка, эльборовый круг, контактная температура, быстрорежущая сталь, коэффициент обрабатываемости, режимы резания.

V.A. Panaioty

INVESTIGATION OF HEAT MODE AT GRINDING USING SOLID LUBRICANTS

The paper reports the investigation of a solid lubricants impact upon a temperature process at different high-speed steel grinding with cBN disks. Temperature measurements were carried out with the aid of an artificial thermocouple. Solid lubricant was applied upon a disk cutting surface with a ceramic bond in the course of processing with the aid of a special device. As a basis of the lubricant composition chosen there was used hexagonal boron nitride. The regularities of contact temperature changes during the machining in different modes (velocity of cBN disk, traverse feed and cross-feed) were revealed, and also an impact upon chemical structure temperature of high-speed steel was

defined for that a machinability factor was used. As a result of experiments were obtained regularities of contact temperature changes in different cutting modes and were presented empirical dependences which allow setting reasonably working conditions. The efficiency of solid lubricant use is shown the application of which allows decreasing thermal process stress almost twice and the recommendations for its efficient application under conditions of production are given.

Key words: solid lubricant, cBN disk, contact temperature, high-speed steel, machinability factor, cutting modes.

Введение

Тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования, оказывают значительное влияние как на протекание процесса, так и на качество поверхности обрабатываемого материала [1-4]. Затрачиваемая при снятии стружки, трении и деформациях работа переходит в тепло, которое создает в зоне контакта абразивного круга и обрабатываемой поверхности быстрорежущей стали поле с высокими температурами [4]. Деформация и нагрев металла происходит очень быстро (за доли секунды), и основное количество тепловой энергии концентрируется в тонком поверхностном слое шлифуемой детали. Этому способствует и сравнительно низкая теплопроводность быстрорежущих сталей.

После прохождения абразивного инструмента происходит быстрое охлаждение поверхностного слоя обрабатываемого металла. Такие температурные перепады, как правило, приводят к структурным изменениям в тонком поверхностном слое шлифуемого металла, вызывают появление остаточных напряжений [5-7].

Для оценки тепловых явлений при шлифовании и их влияния на состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала необходимо знать температуру в зоне контакта абразивного инструмента с деталью, т.е. контактную температуру поверхности детали, а также распределение температуры от шлифуемой поверхности вглубь металла.

Методика эксперимента

Для измерения осредненной контактной температуры шлифования использовали искусственную термопару. В этом случае две проволоочки диаметром 0,1 мм располагали одну строго над другой. Электроды изолировались прокладками слюды толщиной 0,02 мм и располагались между двумя пластинками образца материала. Для размещения комплекта из проволок термопары и слюды в нижней пластине обрабатываемого материала вышлифовывалась канавка тонким алмазным кругом. При шлифовании абразивные зерна стягивают на обрабатываемую поверхность металл электродов и образуют горячий спай термопары. Обоснованием метода служит закон промежуточных металлов, который гласит, что «алгебраическая сумма термо-ЭДС в электрической сети, состоящей из любого числа проводников из разнородных металлов, находящихся при одной и той же температуре, равна нулю».

В качестве искусственной термопары были выбраны хромель-алюмель. Эта тер-

мопара имеет широкий диапазон рабочих температур (от 0 до 1100 °С). При температуре до 600 °С она конкурирует с железо-константановой парой, отличаясь меньшей чувствительностью, но большей линейностью. В диапазоне 600-1100 °С это наиболее применяемая термопара. Сплав хромель содержит 90% никеля и 10% хрома, а алюмель состоит из 94% никеля, 3% марганца, 2% алюминия и 1% кремния.

Исследования проводили на модернизированном станке модели 3А64Д, оснащенном приспособлением для нанесения твердой смазки в процессе обработки. Шлифовали закаленные быстрорежущие стали эльборовыми чашечными кругами ЛЧК 125х32х10х5 на керамической связке С10 различной зернистости и твердости, концентрации 100% структуры №8. Твердую смазку составляли из нескольких компонентов с различной температурой плавления на основе гексагонального нитрида бора [8].

Результаты экспериментов

Было проведено исследование влияния режима резания на контактную температуру поверхности быстрорежущей стали различных марок при шлифовании с применением твердого смазочного материала предложенной композиции.

На величину контактной температуры поверхности шлифуемой детали большое влияние оказывает поперечная подача. На рис. 1 представлен график изменения контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной поперечной подачей (продольная подача - 1 м/мин, скорость резания - 19 м/с). С увеличением поперечной подачи температура на поверхности детали монотонно возрастает. Так, с ростом этой подачи от 0,01 до 0,06 мм/дв.ход температура в зоне контакта

смазанного круга и стали повышается с 120 до 550 °С. При обработке же в обычных условиях контактная температура увеличивается от 240 до 820 °С соответственно. Следовательно, в случае нанесения на режущую поверхность эльборового круга смазочного материала величина контактной температуры намного ниже, чем при шлифовании без применения ТСМ. Так, при поперечной подаче 0,04 мм/дв.ход контактная температура поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании с ТСМ равна 380 °С, т.е. в 1,7 раза меньше, чем при шлифовании без его применения (630 °С). Такое значительное снижение величины контактной температуры можно объяснить уменьшением тепловой мощности, выделяемой в зоне резания [9; 10].

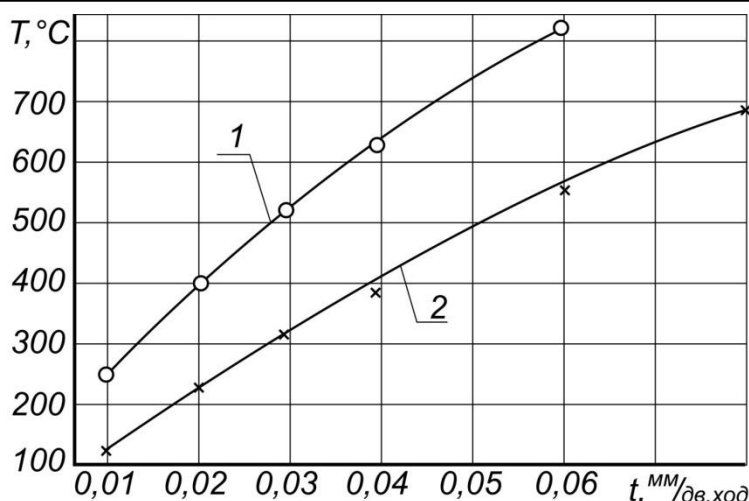


Рис. 1. Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной поперечной подачей ($V=19$ м/с, $S=1$ м/мин): 1 - без TCM; 2 - с TCM

Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании с различной продольной подачей показано на рис. 2. С увеличением продольной подачи контактная температура также повышается. При шлифовании смазанным эльборовым кругом эта температура ниже, чем при обработке без использования TCM. Так, при продольной подаче 0,5 м/мин температура поверхности образца в условиях обработки с применением смазочного материала и без него соответственно равна 150 и 320 $^\circ\text{C}$. Введение в зону резания смазочной композиции способствует снижению контактной температуры поверхности детали в данных условиях в 1,5-2 раза.

Степень влияния поперечной и продольной подачи на контактную температуру определяли, сравнивая её значения при

изменении интенсивности шлифования с 70 до 140 $\text{мм}^3/\text{мин}$. Нижний уровень интенсивности шлифования достигается при работе с поперечной подачей, равной 0,02 мм/дв.ход, и продольной подачей 1 м/мин. Прирост интенсивности шлифования обеспечивали увеличением значения одной из подач, либо продольной, либо поперечной. Экспериментальные данные представлены в табл. 1.

Из представленных экспериментальных данных видно, что повышение продольной подачи, несомненно, более предпочтительно по сравнению с увеличением поперечной подачи. Если с ростом продольной подачи контактная температура при шлифовании смазанным кругом увеличивается в 1,3 раза, то с увеличением поперечной подачи – в 1,7 раза.

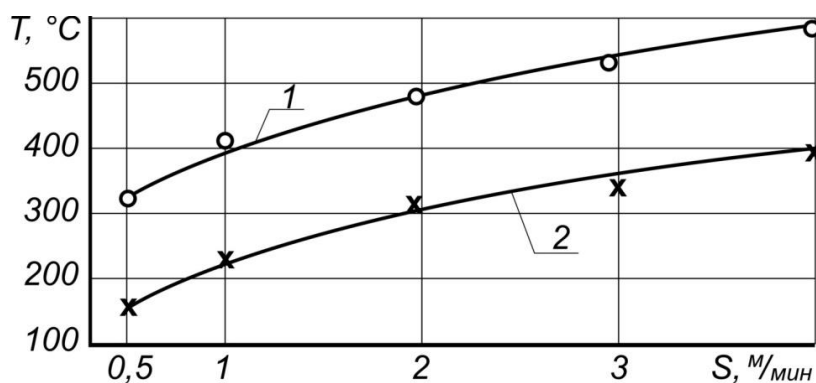


Рис. 2. Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной продольной подачей ($V=19$ м/с, $t=0,02$ мм/дв.ход): 1 - без TCM; 2 - с TCM

Таблица 1

Влияние подач на контактную температуру поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 ($V = 19$ м/с)

Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв.ход	Интенсивность шлифования, мм/мин	Контактная температура (°C) при шлифовании	
			с TCM	без TCM
1	0,02	70	220	400
1	0,04	140	380	630
2	0,02	140	280	470

Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной скоростью резания показано на рис. 3. Видно, что при шлифовании с нанесением смазочного материала на режущую поверхность круга, а также без его применения увеличение скорости резания от 13 до 38 м/с приводит к повышению величины контактной температуры поверхности обрабатываемой стали в 2-2,1 раза. Это обуслов-

лено увеличением тепловой мощности шлифования, выделяемой в зоне контакта, так как её величина зависит от тангенциальной составляющей силы резания, которая при шлифовании смазанным кругом уменьшается приблизительно в 2 раза. Так, при скорости круга, равной 26 м/с, контактная температура поверхности детали при введении в зону резания смазочной композиции уменьшается с 500 до 280 °C, т.е. в 1,8 раза.

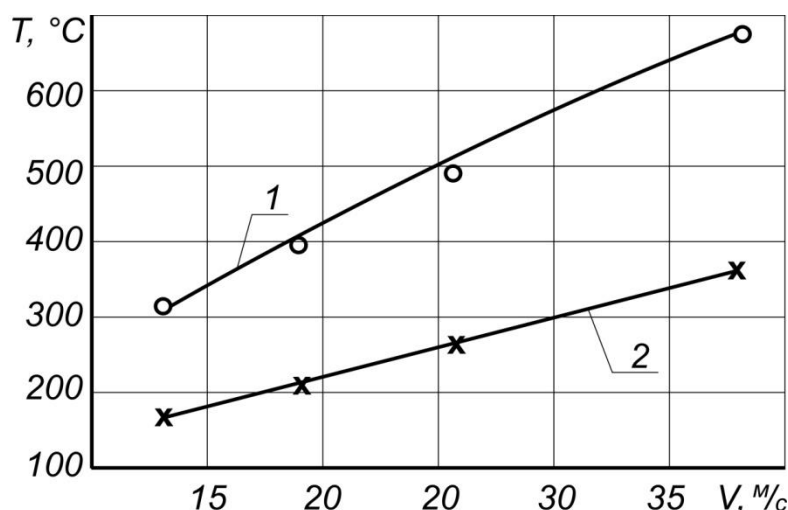


Рис. 3. Изменение контактной температуры поверхности стали Р9Ф5 при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 с различной скоростью резания ($S = 1$ м/мин, $t = 0,02$ мм/дв.ход): 1 - без TCM; 2 - с TCM

Химический состав быстрорежущих сталей не оказывает существенного влияния на величину контактной температуры шлифования (рис. 4). При увеличении коэффициента легированности стали от 1 (сталь Р18) до 1,92 (сталь Р12Ф3К10М3) контактная температура шлифования возросла всего на 80 °C, как при обработке с применением смазочного материала, так и

без него. Однако при шлифовании смазанными кругами из всех быстрорежущих сталей наблюдается снижение контактной температуры в 1,8-1,9 раза. Так, при шлифовании стали Р6М5 ($K_L = 1,02$) контактная температура в случае применения TCM уменьшается с 390 до 200 °C, а стали Р12Ф3К10М3 ($K_L = 1,92$) – с 460 до 280 °C.

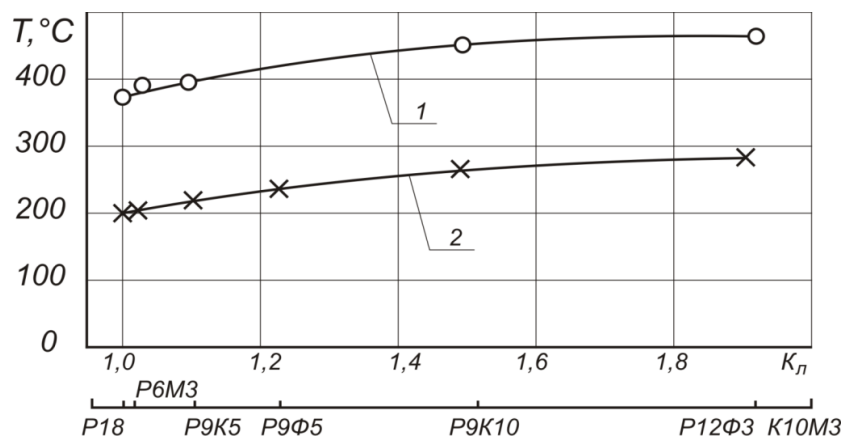


Рис. 4. Контактная температура поверхности различных марок быстрорежущей стали при шлифовании кругом ЛО8 С1 100% С10 ($V=19$ м/с, $S=1$ м/мин, $t=0,02$ мм/дв.ход): 1 - без TCM; 2 - с TCM

Обобщенные зависимости изменения температуры

Получены экспериментальные зависимости изменения контактной температуры от технологических факторов (режимов резания) и коэффициента обрабатываемости быстрорежущей стали разного химического состава. Обобщенные зависимости показателей процесса шлифования от технологических факторов описываются функцией типа

$$T = C_n \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^z \cdot K_M,$$

где C - коэффициент пропорциональности; t - поперечная подача, мм/дв.ход; S - продольная подача, м/мин; V - скорость резания, м/мин; K_M - коэффициент, определяющий влияние марки быстрорежущей стали.

Значения коэффициента пропорциональности и степени зависимости от технологических факторов представлены в табл. 2, а значения коэффициента марки быстрорежущей стали - в табл. 3.

Таблица 2

Значения коэффициента пропорциональности и степени зависимости от режимов резания

Шлифование	Постоянный коэффициент и степени зависимости			
	C	x	y	z
Со смазкой	$9,97 \cdot 10^3$	0,84	0,41	0,68
Без смазки	$1,05 \cdot 10^4$	0,68	0,28	0,70

Таблица 3

Значения коэффициента материала [2]

Марка стали	P18	P6M5	P9K5	P9K10	P12Ф3K10M5
Коэффициент K_M^*	0,95/0,95	0,95/0,95	0,98/0,97	1,03/1,08	1,08/1,17

*В числителе указаны коэффициенты при шлифовании со смазкой, в знаменателе - без смазки. Коэффициент для быстрорежущей стали марки P9Ф5 принят за 1.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ показал, что введение смазочного материала в поры эльборового круга приводит к значительному снижению температуры в зоне

шлифования, и позволил определить закономерности ее изменения в зависимости от технологических факторов и химического состава быстрорежущей стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: кол. моногр. / А.С. Верещагин [и др.]. - М., 2015. - Т. V. - С. 228-264.
2. Панайоти, В.А. Повышение эффективности и качества при шлифовании быстрорежущих сталей с использованием твердых смазок / В.А. Панайоти // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2016. - № 2 (316). - С. 87-91.
3. Панайоти, В.А. Исследование геометрии рельефа режущей поверхности эльборового круга при шлифовании с твердой смазкой / В.А. Панайоти // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2016. - № 1 (315). - С. 67-71.
4. Панайоти, В.А. Исследование влияния твердой смазки на поверхностное упрочнение инструментов из быстрорежущей стали при заточке / В.А. Панайоти // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 2 (50). - С. 41-45.
5. Панайоти, В.А. Исследование структурных превращений в быстрорежущих сталях при шлифовании с применением твердых смазок / В.А. Панайоти // Автоматизация и современные технологии. - 2017. - № 2. - С. 55-60.
6. Панайоти, В.А. Влияние твердых смазок на фазовый состав шлифованной поверхности быстрорежущих сталей / В.А. Панайоти // IV международная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» / ИМАШ РАН. - М.: Спектр, 2015. - С. 189-191.
7. Панайоти, В.А. Влияние твердой смазки на поверхностное упрочнение инструментов из быстрорежущей стали эльборовыми кругами различной зернистости / В.А. Панайоти // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2017. - № 2 (322). - С. 106-109.
8. Панайоти, В.А. Исследование методов нанесения твердой смазки на поверхность шлифовального круга в процессе обработки / В.А. Панайоти // СТИН. - 2016. - № 10. - С. 26-29.
9. Панайоти, В.А. Оценка смазывающей способности ТСМ по удельной работе шлифования / В.А. Панайоти // Наукоемкие технологии на современном этапе развития машиностроения: материалы VII междунар. науч.-техн. конф. (19-21 мая 2016 г.). - М.: Техполиграфцентр, 2016. - С. 160-161.
10. Панайоти, В.А. Оценка смазывающей способности ТСМ по составляющим силы резания / В.А. Панайоти // Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие»: сб. избр. ст. - 2017. - С. 19-27.
1. *Efficient Engineering Technologies, Equipment and Tools: monograph authors' group* / A.S. Vereshchagin [et al.]. - M., 2015. - T. V. - pp. 228-264.
2. Panaioti, V.A. Increase of efficiency and quality at high-speed steel grinding using solid lubricants / *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. - 2016. - No. 2 (316). - pp. 87 - 91.
3. Panaioti, V.A. Investigation of cutting surface geometry in cBN disk at grinding with solid lubricant / V.A. Panaioti // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Techniques*. - 2016. - No. 1 (315). - pp. 67-71.
4. Panaioti, V.A. Investigation of solid lubricant impact upon surface strengthening of high-speed tools at sharpening / V.A. Panaioti // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2016. - No. 2 (50). - pp. 41-45.
5. Panaioti, V.A. Investigation of structural changes in high-speed steel at grinding using solid lubricants / V.A. Panaioti // *Automation and Modern Techniques*. - 2017. - No. 2. - pp. 55-60.
6. Panaioti, V.A. Solid lubricant impact upon phase composition of high-speed steel ground surface / V.A. Panaioti // *the IV-th Inter. Conf. "Fundamental Investigations and Innovation Technologies in Mechanical Engineering"* / IMACH RAS. - M.: Spectrum, 2015. - pp. 189-191.
7. Panaioti, V.A. Solid lubricant impact upon tool high-speed surface strengthening with cBN disks of different granularity / V.A. Panaioti // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Techniques*. - 2017. - No. 2 (322). - pp. 106-109.
8. Panaioti, V.A. *Investigation of Solid Lubricant Application Methods on Abrasive Disk Surface during Processing* / V.A. Panaioti // STIN. - 2016. - 2016. - No. 10. - pp. 26-29.
9. Panaioti, V.A. TSM lubricating ability assessment through specific grinding work / V.A. Panaioti // *Science Intensive Technologies at Modern Stage of Engineering Development: Proceedings of the VII-th Inter. Scientific Tech. Conf. (May 19-21, 2016)* - M.: Techpolygraphcenter, 2016. - pp. 160-161.
10. Panaioti, V.A. TSM lubricating capacity assessment on constituents of cutting force / V.A. Panaioti // *Proceedings of the Conf. SRI "National Development"* Proceedings - 2017. - pp. 19-27.

Статья поступила в редколлегию 15.09.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Московского
технологического университета
Албагачиев А.Ю.

Сведения об авторах:

Панайоти Владимир Александрович, к.т.н., доцент Московского технологического университета (МИРЭА), тел.: +7 (495) 340-21-90; +7 (903) 573-52-73, e-mail: lek00@mail.ru.

Panaioti Vladimir Alexandrovich, Can. Eng., Assistant Prof., Moscow Technological University (MIREA), e-mail: lek00@mail.ru.

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 51-74:621

DOI: 10.12737/article_59cd7660bc6095.31122626

А.И. Андриянов, А.А. Анисимов

АКТИВНЫЙ СИЛОВОЙ ФИЛЬТР ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА С УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Исследован усовершенствованный активный силовой фильтр последовательного типа, в котором не используются датчики тока, что снижает его стоимость. Рассмотрены характеристики фильтра и создана компьютерная модель. Численными методами рассчитаны параметры регулятора, использу-

емого в контуре стабилизации напряжения звена постоянного тока.

Ключевые слова: активный силовой фильтр напряжения, система управления, искажение синусоидальности, регулятор.

A.I. Andriyanov, A.A. Anisimov

ACTIVE POWER FILTER OF SEQUENTIAL TYPE WITH UPDATED SYSTEM OF CONTROL

The paper is devoted to the investigation of an active power filter (APF) of a sequential type updated from the viewpoint of the system of control. As an optimization is taken a refusal to use current sensors and a control system improvement in such a way that a power balance is support through the circuit of a direct current unit. There is also presented an update algorithm of the formation of inner circuit supporting voltage using an untypical approach to the computation of a phase and a fundamental frequency of input phase voltage. A computer model of the APF is created. A

computer simulation proving a working capacity of the algorithm offered for the computation of frequency and a phase of the supporting voltage of input voltages is created. A nomograph allowing the choice of parameters for the regulator of a direct current circuit unit is obtained reasoning from the specified duration of a transient. A simulation confirming the correctness of a regulator parameter choice is carried out.

Key words: active power voltage filter, system of control, sinusoid distortions, regulator.

Введение

Качество электроэнергии определяются целым рядом параметров (ГОСТ 32144-2013, ГОСТ 13109-99). В промышленных сетях наиболее часто возникающим отклонением от требований стандарта является нарушение синусоидальности формы напряжения, что связано с влиянием на сеть других потребителей электроэнергии, поскольку они чаще всего представляют собой нелинейную нагрузку.

Воздействие искажений напряжения на работу электроприборов приводит к ряду проблем, которые можно разделить на несколько групп.

К первой группе можно отнести потери электроэнергии в электрических машинах: при коэффициенте искажения синусоидальности порядка 10% потери в

промышленных сетях могут достичь 15%. Ко второй – сбои в работе оборудования, что может привести к выходу его из строя. К третьей группе можно отнести некорректную работу индукционных счётчиков электроэнергии.

Для исключения негативного влияния на чувствительное оборудование отклонений параметров сети от стандарта применяются силовые фильтры, которые бывают пассивными и активными. Пассивные силовые фильтры обеспечивают только устранение искажения формы напряжения в условиях практически постоянных нагрузок. Активные силовые фильтры напряжения (АСФН) позволяют обеспечить также балансировку фазных напряжений. При этом они имеют мень-

шие габариты, чем пассивные силовые фильтры, и могут работать с широким диапазоном нагрузок, с чем связано их широкое применение в промышленности.

Несмотря на широкое распространение систем рассматриваемого класса и их высокие технические показатели, требуется их дальнейшее совершенствование с целью снижения стоимости и массогабаритных показателей. Наиболее актуальной задачей является оптимизация схемотехники систем управления (СУ) АСФН.

Система управления таких преобразователей представляет собой двухконтурную систему автоматического управления (САУ), в составе которой присутствуют контур напряжения в звене постоянного тока (внешний контур) и контур выходных напряжений и входных токов АСФ (внутренний контур).

На данный момент существует два основных подхода к построению СУ активных силовых фильтров.

Первый подход связан с использованием дискретного преобразования Фурье [1] для расчета опорного напряжения внутреннего контура. Основным недостатком данного метода заключается в очень высоких требованиях к вычислительным ресурсам управляющего микроконтроллера и, соответственно, в высокой стоимости СУ.

Второй подход связан с применением RQ-теории (так называемый RQ-алгоритм). В работе [2] реализуется RQ-алгоритм с фазовой автоподстройкой частоты, который обеспечивает синхронизацию контроллера с прямой последовательностью сетевых напряжений. В [3] рассматривается целый ряд методов управления после-

довательными активными силовыми фильтрами. Так, например, в [3] рассматривается САУ, где опорное напряжение внутреннего контура вычисляется по основной гармонике входного тока, что в ряде случаев приводит к потере устойчивости системы. Кроме того, в [3] предлагается вариант САУ АСФН, где для вычисления опорного напряжения внутреннего контура САУ используется цифровая фильтрация сигналов с датчиков входных напряжений. Также в работе [3] рассмотрен целый ряд вариантов построения систем управления АСФН на базе усовершенствованного RQ-алгоритма с использованием гистерезисного управления по току, мгновенной мощности и средним значениям реактивной и активной мощностей. Для преодоления существующих ограничений в [4] предлагается усовершенствованный вариант RQ-алгоритма, который может быть эффективно использован и при управлении комбинированными активными силовыми фильтрами. Недостатком всего семейства RQ-алгоритмов является необходимость использования датчиков входного тока, что приводит к повышению стоимости АСФН.

Также известны такие методы, как пропорционально-интегральное управление [5], метод управления по среднему значению тока [6], метод скользящего управления [7] и гистерезисное управление [8]. Общим их недостатком, как и в САУ на основе RQ-алгоритмов, является использование датчиков тока.

Таким образом, задача совершенствования систем управления АСФН является актуальной.

Система управления трехфазным активным силовым фильтром

На рис. 1 представлена структурная схема АСФН с применением разработанного метода управления. Как видно из рисунка, она представляет собой замкнутую

двухконтурную САУ с контуром напряжения звена постоянного тока и внутренним контуром выходных напряжений фильтра.

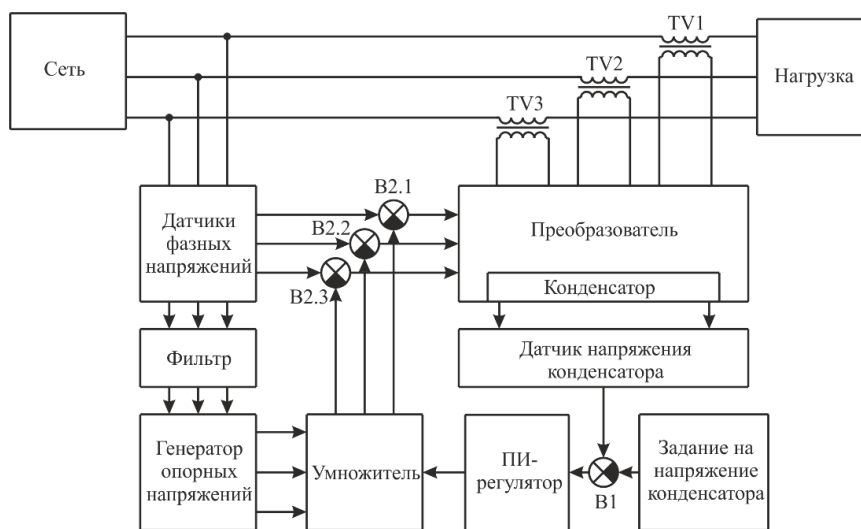


Рис. 1. Структурная схема фильтра

С помощью вычитателя В1 рассчитывается ошибка по напряжению звена постоянного тока, после чего ПИ-регулятор формирует постоянное управляющее напряжение с определенным значением, поступающее на блок «Умножитель», вторыми множителями которого выступают выходные сигналы генератора опорных напряжений единичной амплитуды. Выходные сигналы генератора формируются на основе сигналов датчиков фазных напряжений по предлагаемому в работе алгоритму. Полученные сигналы после умножителя являются задающими сигналами внутреннего контура САУ и поступают на вычитатели В2.1-В2.3, которые вычитают их из сигналов с датчиков фазных напряжений. Результаты вычитания (сигналы управления внутреннего контура) поступают на импульсный модулятор в составе преобразователя. Основной задачей рассмотренной САУ является поддержание напряжения звена постоянного тока неизменным и при этом формирование напряжения последовательных трансформаторов с целью коррекции входного напряжения.

Передаточная функция ПИ-регулятора напряжения звена постоянного тока имеет вид

$$W(p) = K + \frac{1}{Tp},$$

где K - коэффициент передачи пропорциональной части; T - постоянная времени интегратора.

В данной работе предлагается усовершенствованный алгоритм формирования опорного напряжения внутреннего контура, который реализует блок «Генератор опорных напряжений».

Рассмотрим алгоритм формирования опорных сигналов внутреннего контура. Очевидно, что основной задачей в данном случае является вычисление частоты и фазы первой гармоники входных фазных напряжений.

В работе предлагается алгоритм вычисления фазы и частоты первой гармоники входного фазного напряжения, поясняемый рис. 2.

При работе алгоритма управления в реальном времени производится периодическая выборка значений входного фазного напряжения, причем в определенный момент времени размер массива выборок соответствует объему информации, полученной на четверти периода синуса. При получении новой выборки и перед записью ее в массив самая старая выборка удаляется. Таким образом, массив выборок связан с определенным окном во временной области с длительностью, незначительно меньшей четверти периода сетевого напряжения, которое при выполнении алгоритма перемещается во времени, что продемонстрировано на рис. 2а. После каждой выборки оптимальным образом производится расчет суммы значений выборок в массиве.

Основной задачей в данном случае является определение координаты пересечения нуля фазным входным напряжением. Пересечение нуля определяется по смене знака суммы значений выборок в массиве. В этом случае координата точки пересечения нуля соответствует координате точки, находящейся в середине массива. Так, в случае если размерность массива выборок равна 91, то в момент смены знака суммы выборок нас будет интересовать выборка, находящаяся по адресу 46.

Первый этап заканчивается, когда определены координаты трех пересечений нуля ($\hat{t}_1, \hat{t}_2, \hat{t}_3$ на рис. 2) по описанной выше методике. Данные точки являются точками пересечения нуля искаженного входного напряжения.

На втором этапе определяются координаты точек пересечения нуля первой гармоники входного напряжения, для чего рассчитывается абсолютная коррекция по выражению

$$\Delta t_k = \frac{(\hat{t}_3 - \hat{t}_2) - (\hat{t}_2 - \hat{t}_1)}{4}.$$

При этом в случае искаженного напряжения (рис. 2б) $(\hat{t}_3 - \hat{t}_2) \neq (\hat{t}_2 - \hat{t}_1)$. В случае отсутствия искажения входного напряжения абсолютная коррекция $\Delta t_k = 0$.

Координаты точек пересечения нуля первой гармоникой в предлагаемом алгоритме определяются по выражениям (рис. 2б):

$$t_1 = \hat{t}_1 - \Delta t_k;$$

$$t_2 = \hat{t}_2 + \Delta t_k;$$

$$t_3 = \hat{t}_3 - \Delta t_k.$$

При этом выполняется равенство $(t_3 - t_2) = (t_2 - t_1)$. Очевидно, что, зная координаты указанных точек, можно рассчитать частоту и фазу первой гармоники входного напряжения, которое является опорным и определяет фазу и частоту сигнала задания внутреннего контура. Расчет амплитуды опорного напряжения при реализации СУ АСФ не требуется, и она принимается равной 1.

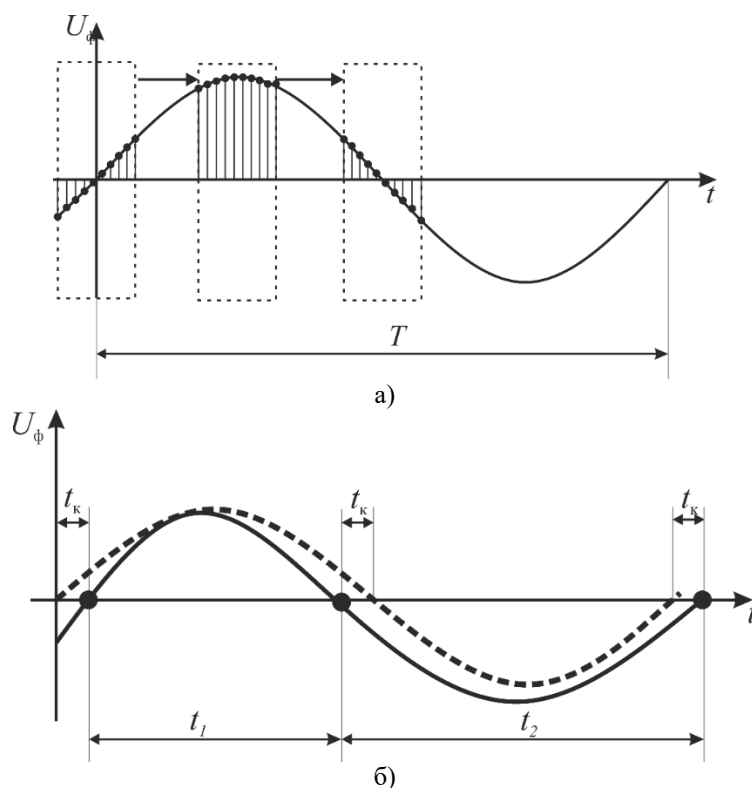


Рис. 2. К пояснению алгоритма расчета фазы и частоты первой гармоники входного напряжения: а - поиск точек пересечения входного фазного напряжения с нулем; б - коррекция координат точек

На рис. 3 представлены результаты моделирования работы указанного алгоритма.

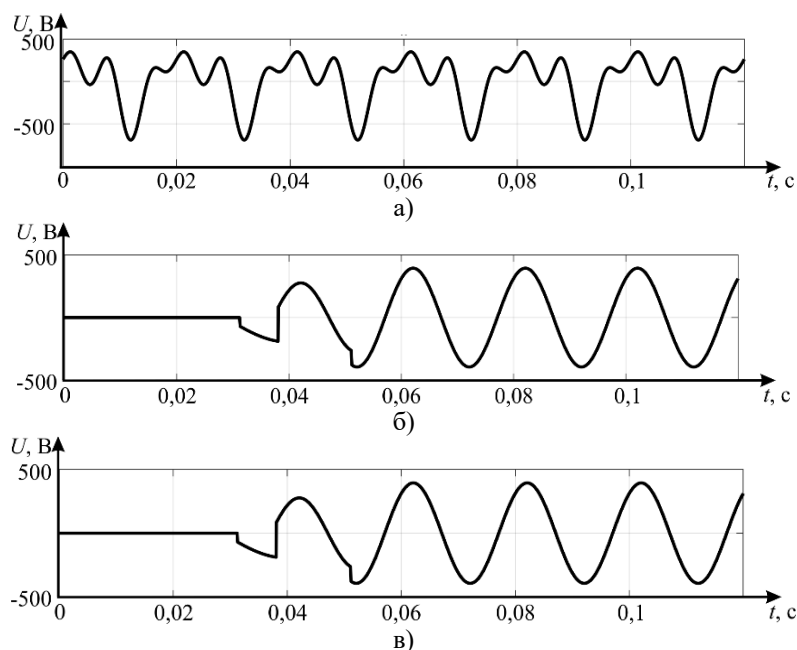


Рис. 3. Результаты моделирования работы алгоритма расчета фазы и частоты опорного напряжения: а - входное напряжение активного силового фильтра; б - опорное напряжение, рассчитанное с помощью разработанного алгоритма; в - опорное напряжение внутреннего контура, полученное с помощью быстрого преобразования Фурье

Как видно из рис. 3, полученное с применением разработанного алгоритма опорное напряжение (рис. 3б) практически полностью совпадает с опорным напряжением, полученным с помощью быстрого преобразования Фурье (эталонный алгоритм) (рис. 3в). Погрешность определения

фазы составила 1%, а погрешность определения частоты составила 0,5%. Таким образом, разработанный алгоритм не уступает быстрому преобразованию Фурье по точности расчета частоты и фазы опорного напряжения внутреннего контура.

Компьютерное моделирование активного силового фильтра

В данном разделе представлены результаты компьютерного моделирования разработанной системы в среде MatLab Simulink. Система имеет следующие параметры: действующее значение входного напряжения $U_{вх}=79$ В, частота сети $f_c=50$ Гц, емкость конденсатора $C=0,5$ мФ, заданное напряжение звена постоянного тока $U_c=40$ В. Компьютерная модель системы представлена на рис. 4.

При выполнении моделирования основными задачами являются проверка ка-

чества напряжения после фильтрации и выбор параметров регулятора напряжения в звене постоянного тока, что затруднительно сделать в аналитической форме. Выбор параметров ПИ-регулятора будем осуществлять по требуемому времени переходного процесса и перерегулирования.

На рис. 5 приведена номограмма для выбора параметров регулятора по требуемому времени переходного процесса в звене постоянного тока.

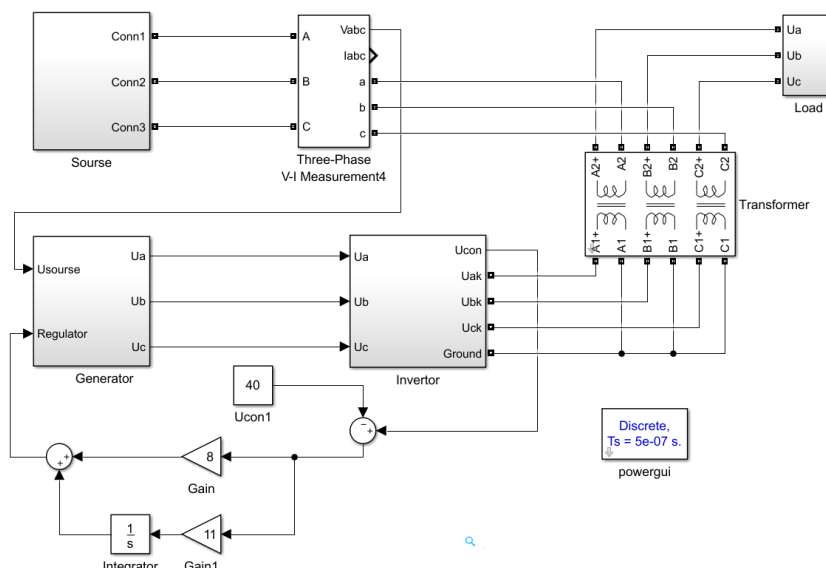


Рис. 4. Компьютерная модель активного силового фильтра

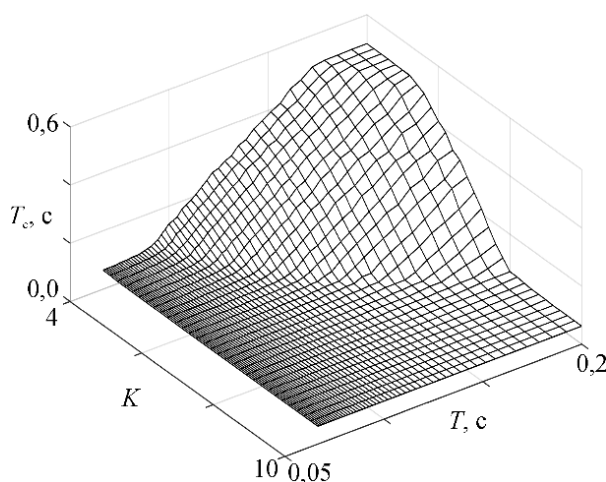


Рис. 5. Номограмма времени переходного процесса в контуре напряжения звена постоянного тока

Как видно из рисунка, номограмма представляет собой гладкую поверхность, демонстрирующую рост времени переходного процесса при изменении параметров ПИ-регулятора. Также стоит отметить, что в выбранных диапазонах вариации параметров системы процесс в звене постоянного тока является монотонным, т.е. время перерегулирования равно нулю. Из рис. 5 видно, что наиболее оптимальными параметрами регулятора являются $K=8$, $T=0,091$ с, поскольку данные значения соответствуют точке минимума.

На рис. 6 представлены временные диаграммы выходного напряжения АСФ в

момент запуска процесса фильтрации ($t=0,05$ с). Моделирование проводилось при выбранных ранее параметрах регулятора. Как видно из рисунка, после запуска процесса фильтрации напряжение принимает синусоидальную форму. До запуска процесса фильтрации коэффициент искажения синусоидальности составлял $K_f=21\%$, а после начала фильтрации он составил 1% , что подтверждает работоспособность разработанной системы. Форма корректирующего напряжения на вторичных обмотках последовательных трансформаторов в процессе фильтрации представлена на рис. 6б.

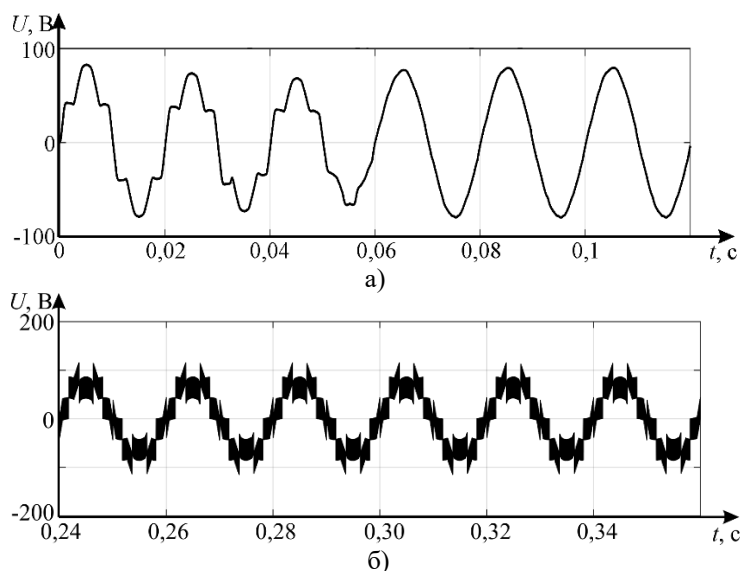


Рис. 6. Временные диаграммы напряжений: а - на выходе фильтра; б - вторичной обмотки последовательного трансформатора

Для оценки скорости работы регулятора напряжения звена постоянного тока были исследованы начальный пуск АСФН

и реакция системы на скачок входного напряжения (рис. 7).

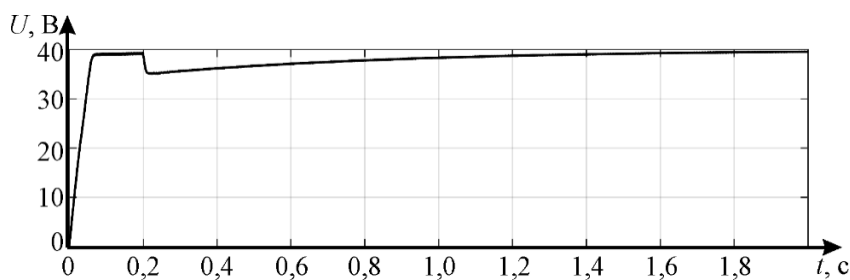


Рис. 7. Напряжение на конденсаторной батарее при пуске системы и скачке входного напряжения

Как следует из рис. 7, время переходного процесса при пуске составило 0,06 с, а отклонение напряжения звена постоянного тока при скачке входного напряжения от 79 до 45,5 В в момент 0,2 с составило 5 В. Время возврата системы к заданному значению напряжения звена по-

стоянного тока после скачка входного напряжения составило 1,8 с.

Таким образом, компьютерное моделирование показало работоспособность разработанной системы управления АСФН и корректность выбора параметров регулятора.

Выводы

1. Разработана усовершенствованная система управления активным силовым фильтром последовательного типа, обеспечивающая снижение стоимости устройства благодаря отсутствию датчиков тока.

2. Создана компьютерная модель фильтра с усовершенствованным алгоритмом управления, обеспечивающая возможность предварительного исследования и выбора параметров системы.

3. В результате компьютерного моделирования активного силового фильтра была получена номограмма, позволяющая выбрать параметры регулятора исходя из заданной длительности переходного процесса.

4. Подтверждена работоспособность предлагаемого алгоритма расчета частоты и фазы опорного напряжения контура входных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Князев, Б.А. Дискретное преобразование Фурье - как это делается / Б.А. Князев, В.С. Черкасский // Вестник НГУ. Серия «Физика». - 2008. - Т. 3. - Вып. 4. - С. 74-86.
2. Pinto, J.G. Transformerless Series Active Power Filter to Compensate Voltage Disturbances / J.G. Pinto, Helder Carneiro, Bruno Exposto, Carlos Couto, João L. Afonso // Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011). - Birmingham, United Kingdom, 2011. - P. 1-6.
3. Litran, P. Compensation of voltage unbalance and current harmonics with a series active power filter / P. Litran, P. Salmeron, J.R. Vazquez, J.L. Flores // Renewable Energy & Power Quality Journal. - 2005. - № 3.
4. Vikash Anand, Dr.S.K. Srivastava // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). - 2012. - Vol. 2. - Is. 4. - P. 1073-1080.
5. Buso, S. Comparison of current control Techniques

for Active power Filter Applications / S. Buso, L. Malesani, P. Mattavelli // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 1998. - Vol. 45. - № 5. - P. 722-729.

6. Lee, G.-Myoung. Control of Series Active Power Filters Compensating for Source Voltage Unbalance and Current Harmonics / G.-Myoung Lee, Dong-Choon Lee, Jul-Ki Seok // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2004. - Vol. 51. - № 1. - P. 132-139.
7. Sato, Y. A control strategy for general - purpose active filters based on voltage detection / Y. Sato, T. Kawase, M. Akiyama, T. Kataoka // IEEE Trans. Ind. Appl. - 2000. - Vol. 36. - № 5. - P.1405-1412.
8. Charles, S. Comparison of three phase shunt active power filter algorithms / S. Charles, G. Bhuvaneshwari // International Journal of Computer and Electrical Engineering - 2010. - Vol. 2. - № 1. - P. 175-180.

1. Knyazev, B.A. Discrete Fourier transform – how it is carried out / B.A. Knyazev, V.S Cherkassky // *Bulletin of NSU. Series “Physics”*. – 2008. – Vol.3. Issue 4. – pp. 74-86.
2. Pinto, J.G. Transformerless Series Active Power Filter to Compensate Voltage Disturbances / J.G. Pinto, Helder Carneiro, Bruno Exposto, Carlos Couto, João L. Afonso // Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011). - Birmingham, United Kingdom, 2011. - P. 1-6.
3. Litran, P. Compensation of voltage unbalance and current harmonics with a series active power filter / P. Litran, P. Salmeron, J.R. Vazquez, J.L. Flores // Renewable Energy & Power Quality Journal. - 2005. - № 3.
4. Vikash Anand, Dr.S.K. Srivastava // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). - 2012. - Vol. 2. - Is. 4. - P. 1073-1080.
5. Buso, S. Comparison of current control Techniques

for Active power Filter Applications / S. Buso, L. Malesani, P. Mattavelli // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 1998. - Vol. 45. - № 5. - P. 722-729.

6. Lee, G.-Myoung. Control of Series Active Power Filters Compensating for Source Voltage Unbalance and Current Harmonics / G.-Myoung Lee, Dong-Choon Lee, Jul-Ki Seok // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2004. - Vol. 51. - № 1. - P. 132-139.
7. Sato, Y. A control strategy for general - purpose active filters based on voltage detection / Y. Sato, T. Kawase, M. Akiyama, T. Kataoka // IEEE Trans. Ind. Appl. - 2000. - Vol. 36. - № 5. - P.1405-1412.
8. Charles, S. Comparison of three phase shunt active power filter algorithms / S. Charles, G. Bhuvaneshwari // International Journal of Computer and Electrical Engineering - 2010. - Vol. 2. - № 1. - P. 175-180.

Статья поступила в редколлегию 15.09.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета
Федяева Г.А.

Сведения об авторах:

Андрьянов Алексей Иванович, к.т.н., доцент кафедры «ЭРЭиЭС» Брянского государственного технического университета, e-mail: ahaos@mail.ru.

Andriyanov Alexey Ivanovich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “ERE and ES”, Bryansk State Technical University, e-mail: ahaos@mail.ru.

Анисимов Андрей Александрович, ассистент кафедры «ПЭиЭ» Брянского государственного технического университета, e-mail: andreyaleksandrovichanisimoff@gmail.com.

Anisimov Andrey Alexandrovich, Assisten of the Dep. “PE and E”, Bryansk State Technical University, e-mail: andreyaleksandrovichanisimoff@gmail.com.

УДК 621.77.016:621.78.061

DOI: 10.12737/article_59cd7640214391.75951196

В.А. Логвин, И.В. Терешко, В.В. Редько-Бодмер, С.А. Шептунов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ ВИДИМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПРИ СОЗДАНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Представлены результаты исследований возможности использования фотоэлектрического способа контроля стабильности интенсивности видимого излучения тлеющего разряда при обработке изделий. Установлено, что интенсивность видимого излучения плазмы зависит от основных параметров

процесса обработки изделий и поддается контролю и стабилизации.

Ключевые слова: плазма, тлеющий разряд, интенсивность излучения, автоматизированная технологическая среда, вакуумные установки.

V.A. Logvin, I.V. Tereshko, V.V. Redko-Bodmer, S.A. Sheptunov

USE OF PHOTOELECTRIC METHOD FOR CONTROL OF GLOW DISCHARGE VISIBLE RADIATION AT CREATION OF AUTOMATED TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT FOR MATERIAL MACHINING

The paper reports the investigation results of photoelectric method possibility for the intensity stability control of glow discharge visible radiation at product processing. It is defined, that the intensity of plasma visible radiation depends upon basic parameters of a product working process and submits to the control and stabilization. The developed method of control has shown its efficiency and working capacity in the whole

range of process parameter changes and could be used in the system of control at the development of the automated technological environment for realization of new technologies based on glow discharge use.

Key words: plasma, glow discharge, radiation intensity, automated technological environment, vacuum plants.

Введение

Эффективным для упрочнения и пластификации металлов и сплавов является способ, основанный на формировании в них уравновешенной структуры поверхности посредством воздействия низкоэнергетической плазмы тлеющего разряда [1–8]. Использование плазмы тлеющего разряда для структурирования материалов позволяет подвергать уже готовые к эксплуатации изделия воздействию ионных потоков без изменения их геометрии. Это процесс взаимодействия хаоса налетающих ионов и кристаллических решёток облучаемых мишеней, не требующий формирования концентрированных ионных пучков. Для обеспечения высокой воспроизводимости результатов необходим эффективный контроль стабильности параметров плазмы тлеющего разряда и, в первую очередь, постоянства концентрации ионов вблизи ка-

тода, определяющих самоорганизационные процессы в объёме упрочняемых изделий.

Наиболее важными для тлеющего разряда являются процессы, протекающие непосредственно на самом катоде и в прикатодной области темного пространства и связанные с образованием потока электронов для ионизации межэлектродного пространства. Качество обработки поверхности изделий зависит от стабильности этих процессов и, в частности, от стабильности и степени интенсивности плазменного облака как у анода, так и в стратах, особенно вблизи катодной области. Установление взаимосвязи между степенью интенсивности плазмы и возможностью экспериментального определения ее влияния на основные физико-механические свойства твердых тел, подвергнутых воздействию

тлеющего разряда, является важным для процесса их обработки [9-13].

Эффективность обработки в тлеющем разряде определяется степенью интенсивности плазмы, способствующей формированию заряженных частиц, непосредственно участвующих в бомбардировке поверхности изделий, расположенных на катоде. Для снижения энергозатрат и сокращения времени обработки при одновременном обеспечении заданного качества поверхности необходимо стабилизировать степень интенсивности плазмы, обеспечивающей концентрацию образующихся вследствие ионно-электронной и фотоэлектронной эмиссий заряженных частиц. Определенная часть электронов участвует в рекомбинации положительно заряженных ионов, что также снижает степень интенсивности плазмы в прикатодной области [9-13].

В тлеющем разряде суммарная эмиссия электронов с катода складывается из отдельных актов эмиссии, обусловленных попаданием на катод ионов, возбужденных атомов, быстрых нейтральных атомов. Эти процессы сопровождаются возбуждением молекул газовой технологической среды с последующим переходом их в нормальное состояние с излучением кванта света. Спектральный состав света, излучаемого плазмой тлеющего разряда, определяется используемым газовым составом, а интенсивность света – концентрацией возбужденных атомов и ионов. Постоянство этих и других параметров характеризует стабильность тлеющего разряда, а следова-

тельно, и воспроизводимость его воздействия на облучаемые материалы.

Определяющим условием для тлеющего разряда являются процессы, происходящие непосредственно на самом катоде и в прикатодной области темного пространства. Эти же процессы определяют качество обработки поверхности изделий. Поэтому исследование зависимости интенсивности видимого интегрального излучения, или излучения в отдельных участках спектра, от электрических параметров плазмы (ток в разряде, напряжение на электродах) и давления газовой среды составляет основу фотоэлектрических способов контроля стабильности плазмы тлеющего разряда.

Поскольку концентрация возбужденных атомов и ионов газовой среды определяет интенсивность излучаемого света, то этот факт можно использовать для контроля стабильности физических условий тлеющего разряда в прианодной и прикатодной областях разрядного промежутка.

Главной задачей работы является разработка и исследование фотоэлектрического способа контроля стабильности плазмы тлеющего разряда, обеспечивающего воспроизводимость основных самоорганизационных процессов в металлах и сплавах, подвергаемых низкоэнергетическому воздействию ионов, с целью разработки новых способов, технологий и автоматизированных устройств для создания автоматизированной технологической среды.

Методика исследования

Для решения поставленной задачи были разработаны и изготовлены два фотоэлектрических устройства - насадки, прикрепляемые на смотровые окна вакуумной камеры установки и расположенные на уровне прикатодной и прианодной областей. Насадки включают фотодиоды, направляющие для установки светофильтров из цветных калиброванных стекол [14] и электроизмерительные приборы.

Для реализации фотоэлектрического способа использовались фотодиоды с наибольшей светочувствительностью в синей и красной областях спектра.

Устройство [15] (рис. 1) состоит из корпуса 1, на котором с внутренней стороны закреплен фотодиод 2, и системы контактов 3, к которым подсоединены выход фотодиода 2 и вход регистрирующего устройства 4.

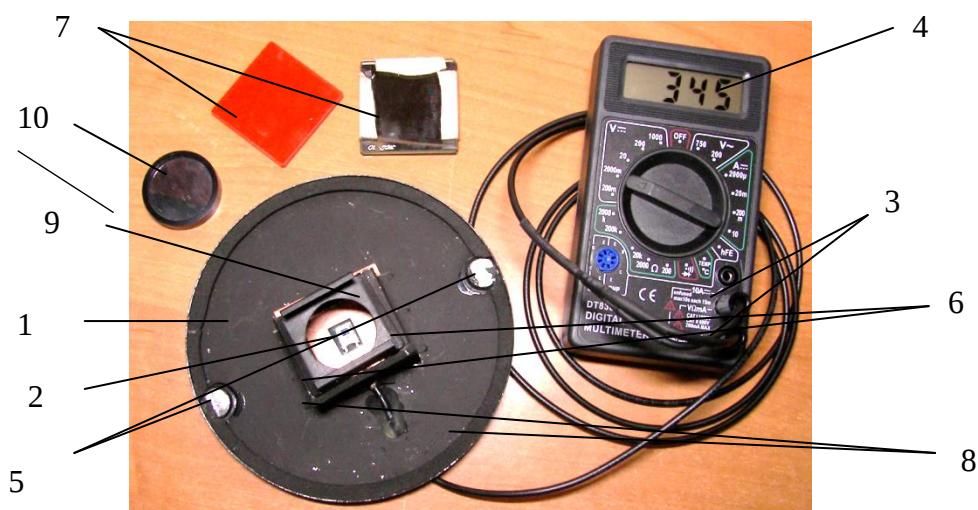


Рис. 1. Устройство для контроля интенсивности видимого излучения плазмы тлеющего разряда

На внутренней стороне корпуса 1 дополнительно установлены постоянные магниты 5 для быстрого крепления и снятия корпуса 1 и направляющие 6 для быстрой установки и снятия светофильтров 7. Вокруг направляющих 6 и корпуса 1 установлены фиксирующе-затягивающие упругие шторки 8. На направляющих 6 дополнительно установлены прижимы 9 с возможностью быстрой установки и снятия интерференционного фильтра 10. В направляющие 6 может устанавливаться светофильтр 7, необходимый для контроля излучения плазмы тлеющего разряда в красной или синей области спектра, таким образом, чтобы фиксирующе-затягивающие упругие шторки 8 плотно прилегали по периметру светофильтра 7 после установки на смотровом окне вакуумной камеры в прикатодной 11 и прианодной 12 областях тлеющего разряда (рис. 2). Выход фотодиода 2 и вход регистрирующего устройства 4 соединяются проводами. Устройство для контроля интенсивности излучения плазмы тлеющего разряда устанавливается на смотровое окно вакуумной камеры и фиксируется при помощи постоянных магнитов 5.

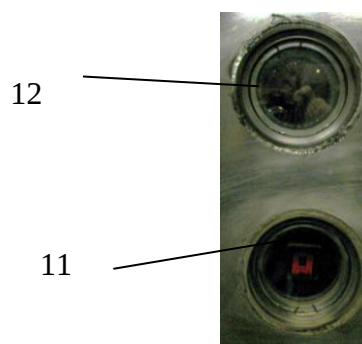


Рис. 2. Расположение устройств для контроля интенсивности видимого излучения плазмы тлеющего разряда на смотровых окнах вакуумной камеры

С помощью этих устройств проводились два вида фотоэлектрических измерений: интенсивности видимого интегрального излучения плазмы в прианодной и прикатодной областях и излучения в красной и синей частях спектра излучения аргона, в которых находятся основные спектральные линии излучения атомов аргона.

Измерения интегрального видимого излучения плазмы проводились с использованием фотодиодов, имеющих максимальную чувствительность в видимой области спектра.

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментально установлено, что изменения интенсивности интегрального видимого излучения плазмы вблизи анода и катода в зависимости от изменения электрических параметров плазмы идентичны, но интенсивность излучения в прикатодной области больше, чем в прианодной. Кроме того, с учетом важности процессов, проходящих на катоде, все измерения видимого излучения плазмы представлены только для прикатодной области.

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности интегрального видимого излучения плазмы тлеющего разряда от напряжения на электродах при давлении аргона 1,6; 3; 4 и 8 Па.

Установлено, что зависимость интенсивности интегрального видимого излучения плазмы тлеющего разряда при увеличении напряжения имеет нелинейный характер с изломами, указывающими на возможность наличия в разряде так называемой ступенчатой ионизации, которая проявляется при одно-, двух- и трехкратной

ионизации ионов аргона электронным ударом, как в прианодной, так и в прикатодной областях. При этом изменяется и ток разряда, также зависящий от напряжения на электродах и давления аргона (рис. 4). Причем чем больше давление аргона, тем при меньшем напряжении на электродах возникает переход аномального тлеющего разряда в дуговой. Эти данные не являются достаточно информативными для выбора оптимальных параметров плазмы и решения поставленных задач. Поэтому были проведены предварительные экспериментальные исследования зависимости качества обработанных поверхностей от давления и тока в разряде. Установлено, что оптимальными параметрами являются значения тока в интервале 10...100 мА, давления 2...10 Па, напряжения на электродах 200...1500 В. Оптимальные значения напряжений и давлений аргона для получения тока в разряде 100, 75 и 50 мА приведены в табл. 1.

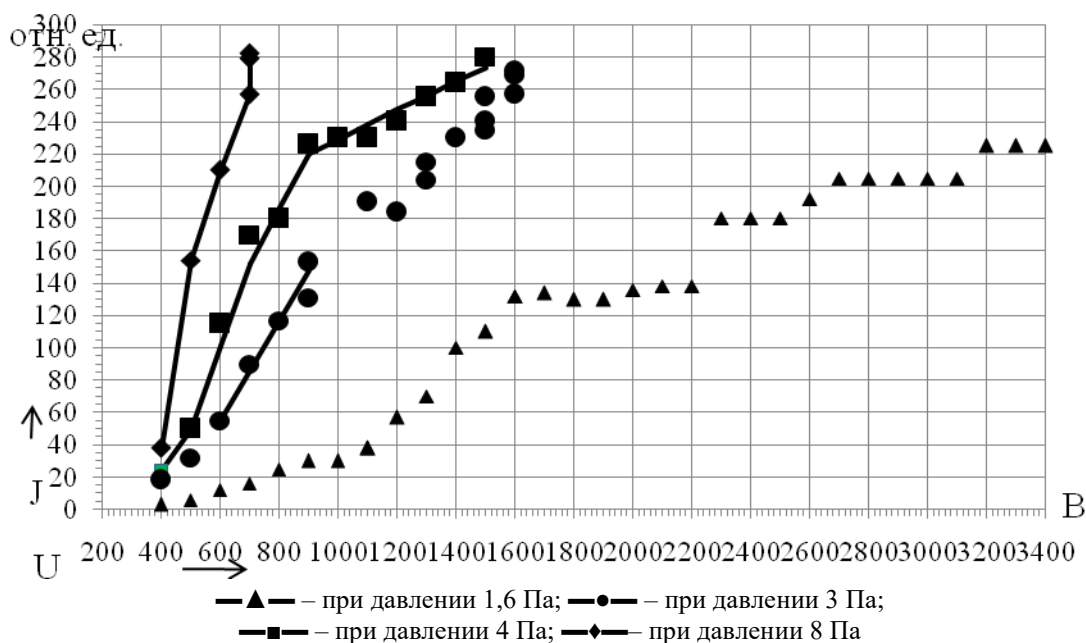


Рис. 3. Зависимость интенсивности интегрального видимого излучения плазмы тлеющего разряда от напряжения на электродах

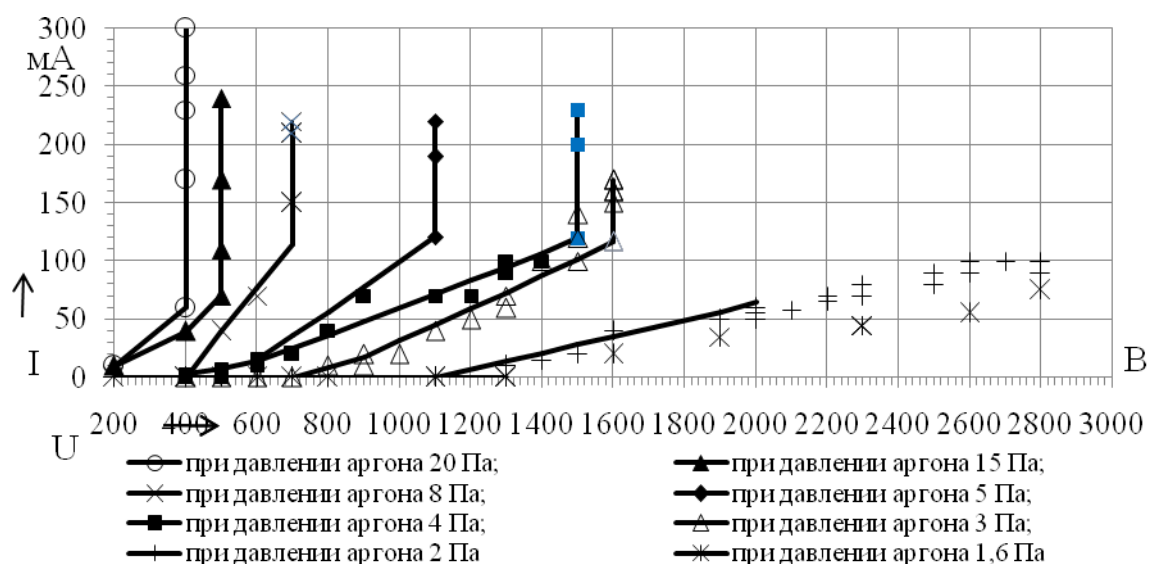


Рис. 4. Зависимость величины тока тлеющего разряда от напряжения на электродах

Таблица 1

Значения напряжений на электродах для получения оптимального тока тлеющего разряда
(в вольтах)

Ток тлеющего разряда I , мА	Давление аргона P , Па				
	2	4	5	8	15
100	2500	1300	950	700	—
75	2400	1100	850	600	450
50	2100	900	750	540	440

При этих электрических параметрах тлеющего разряда интенсивность свечения плазмы меняется от 75 до 300 отн. ед. при

изменении тока от 10 до 100 мА (рис. 5) и изменении напряжения на электродах от 200 до 1500 В (рис. 6).

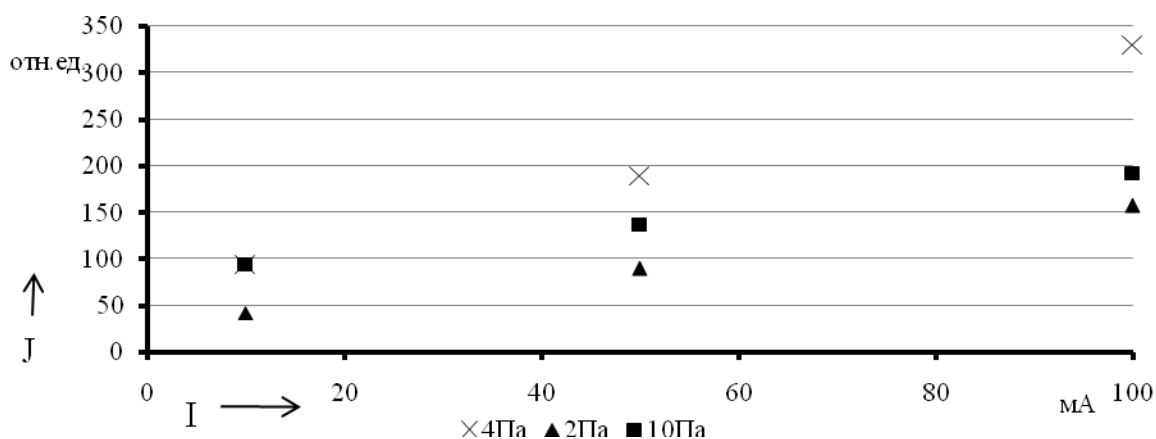


Рис. 5. Зависимость интенсивности видимого излучения плазмы тлеющего разряда от тока в разряде

Из рис. 5 и 6 видно, что интенсивность интегрального видимого излучения

плазмы является линейной функцией тока в разряде и напряжения в определенных

пределах, что указывает на возможность использования фотоэлектрического способа измерения интенсивности интегрального видимого излучения плазмы в качестве

метода контроля стабильности условий при обработке материалов в тлеющем разряде при указанных параметрах.

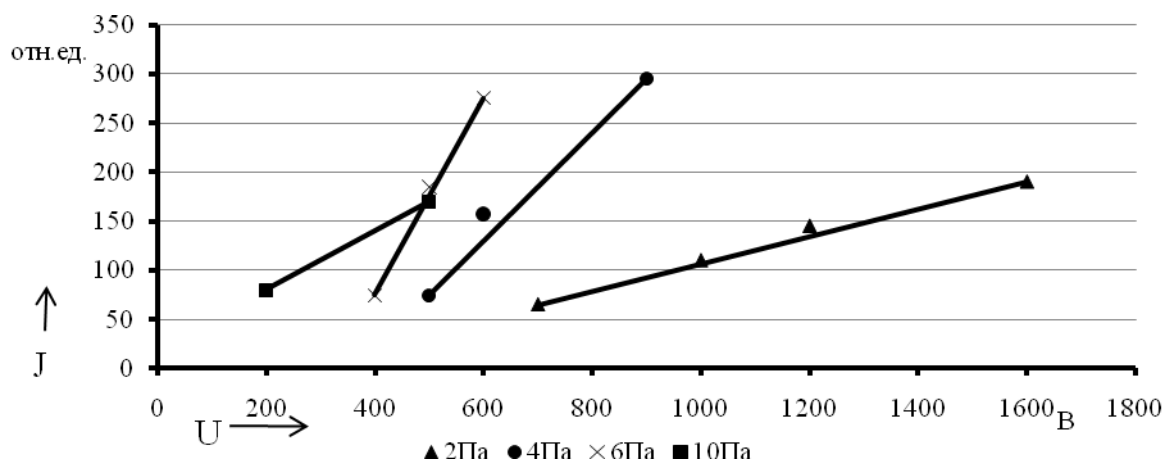


Рис. 6. Зависимость интенсивности видимого излучения плазмы тлеющего разряда от напряжения на электродах при разных давлениях аргона

На рис. 7 представлены зависимости отношений изменения интенсивности ΔJ видимого излучения плазмы к изменению тока ΔI плазмы ($\Delta J/\Delta I$) и напряжения ($\Delta J/\Delta U$) при разных давлениях. Видно, что при давлении аргона 10 Па величины отношений $\Delta J/\Delta I$ и $\Delta J/\Delta U$ уменьшаются, что указывает на уменьшение интенсивности

видимого излучения плазмы при увеличении концентрации ионов аргона. Можно предположить, что причиной этого может быть явление, известное в оптике как «концентрационное тушение», связанное с передачей энергии возбужденных атомов соседним невозбужденным атомам без излучения кванта света.

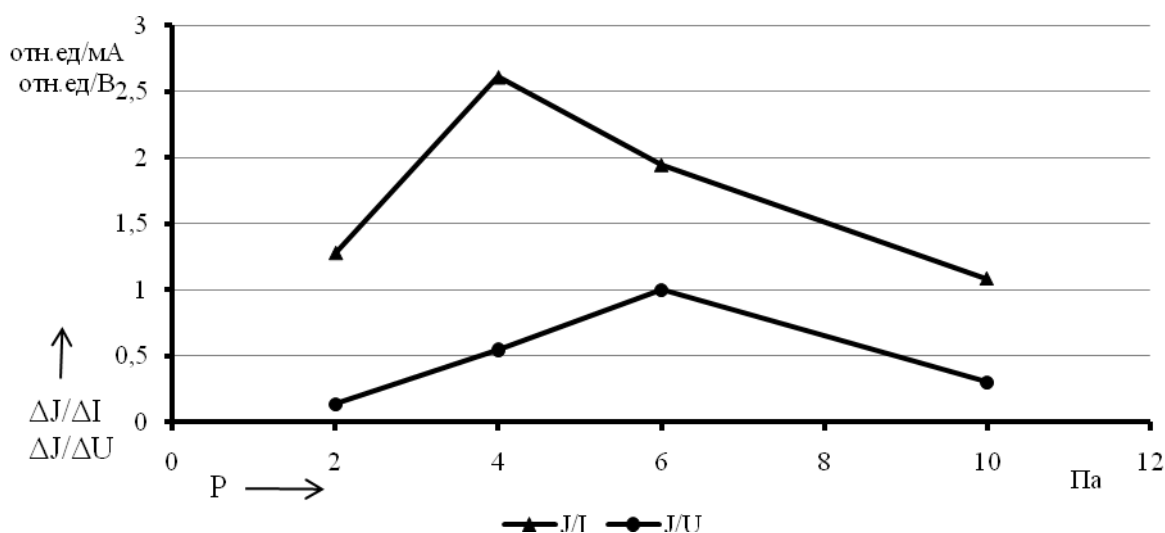


Рис. 7. Зависимость относительных изменений интенсивности видимого излучения плазмы тлеющего разряда от давления аргона в вакуумной камере

Цвет видимого излучения плазмы тлеющего разряда в атмосфере аргона обу-

словлен наличием в его оптическом спектре групп спектральных линий в диапазо-

нах 590...650 нм (красная область спектра) и 410...480 нм (синяя область спектра). Для фотоэлектрических измерений из интегрального видимого излучения выделялась каждая область спектра в отдельности с помощью калиброванных цветных стекол. Их оптические параметры приведены в каталоге цветного стекла [14].

Исследовались такие же зависимости интенсивности видимого излучения в синей и красной областях спектра аргона от электрических параметров плазмы тлеющего разряда.

Установлено, что регистрируемая фотодиодом интенсивность излучения плазмы в красной и синей областях спектра вблизи катода в несколько раз больше, чем вблизи анода. Поэтому все изложенные ниже результаты спектральных измерений зависимости интенсивности от параметров плазмы тлеющего разряда относятся к прикатодной области.

На рис. 8 представлены результаты исследований зависимости интенсивности видимого излучения плазмы тлеющего

разряда от напряжения на электродах в красной и синей областях спектра при давлении аргона 2; 4; 6 и 10 Па (без учета спектральной чувствительности фотодиода в синей области спектра).

Установлено, что регистрируемая интенсивность излучения плазмы в синей области (без учета чувствительности) спектра меньше интенсивности излучения в красной области в 4...6 раз в зависимости от давления аргона. Отношение изменения интенсивности к изменению напряжения на электродах ($\Delta J/\Delta U$) в синей области спектра изменяется от 0,03 до 0,11, а в красной - от 0,11 до 0,38. В красной и синей областях спектра видимого излучения плазмы тлеющего разряда наблюдается уменьшение отношения изменения интенсивности излучения плазмы к изменению напряжения на электродах ($\Delta J/\Delta U$) при давлении 10 Па и более, что может служить подтверждением высказанного выше предположения о появлении в плазме так называемого концентрационного тушения излучения.

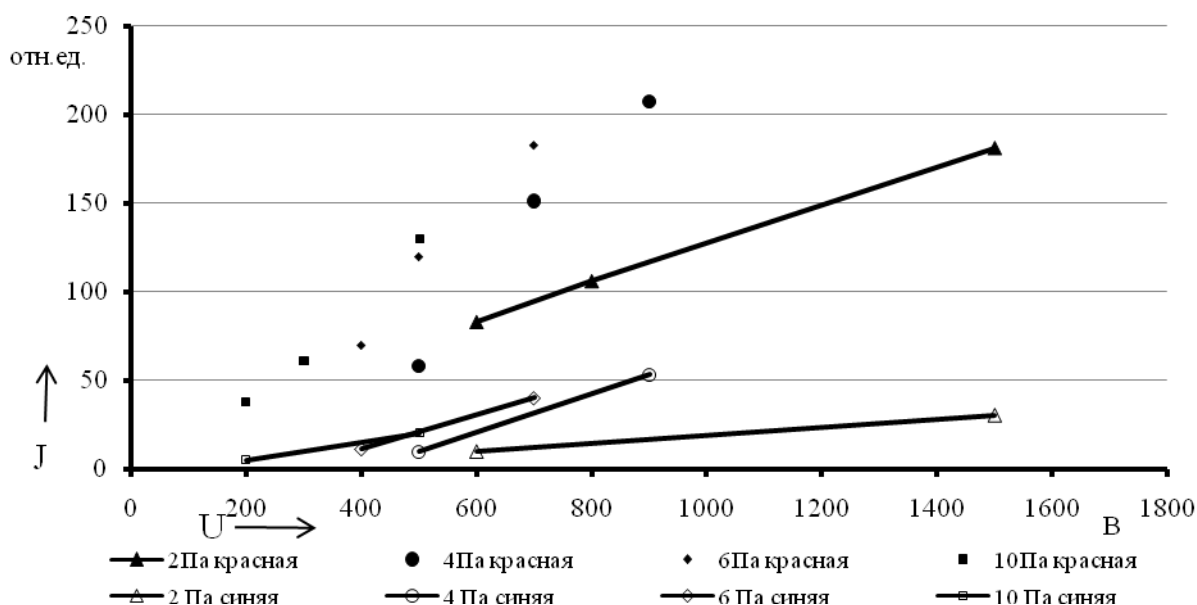


Рис. 8. Зависимость интенсивности видимого излучения плазмы от напряжения на электродах при различных давлениях аргона

Результаты исследований зависимости регистрируемой интенсивности излучения плазмы в красной и синей областях

спектра от тока в разряде представлены на рисунке 9 (без учета спектральной чувствительности фотодиода).

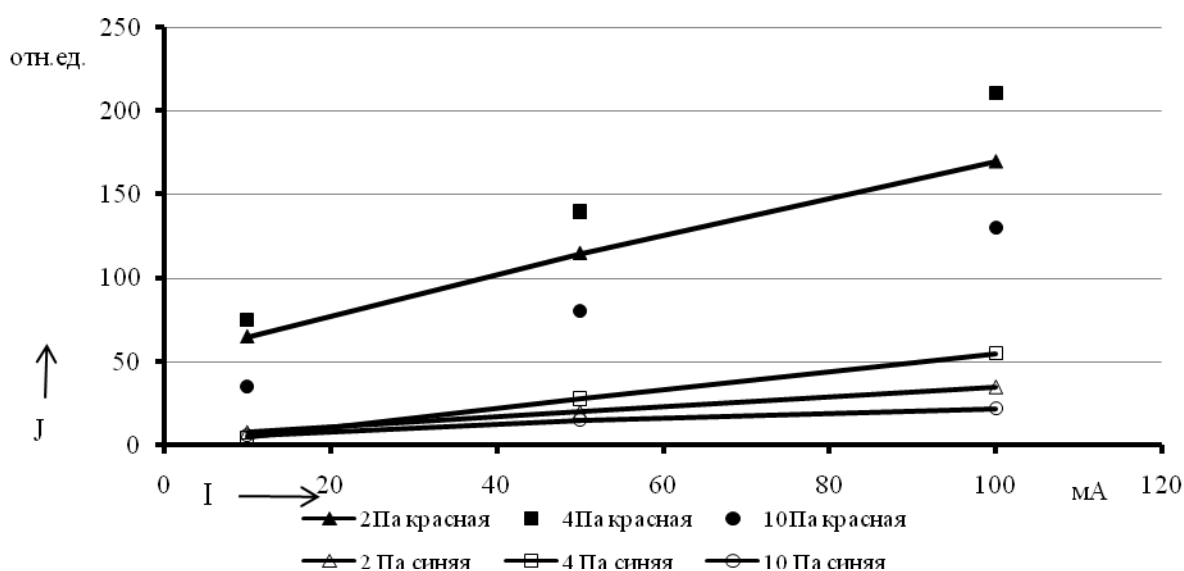


Рис. 9. Зависимость интенсивности видимого излучения плазмы от тока разряда при различных давлениях аргона

Регистрируемое приборами излучение плазмы в синей области спектра меньше, чем в красной области, в 4...6 раз в зависимости от давления аргона в вакуумной камере, а изменение интенсивности при изменении величины тока в разряде ($\Delta J/\Delta I$) также уменьшается при давлении аргона 10 Па и более (табл. 2).

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что для контроля стабильности плазмы тлеющего разряда нецелесообразно использовать измерения интенсивности излучения в синей области спектра видимого излучения аргона вследствие небольшой чувствительности диодов в этой области.

Таблица 2

Отношение изменения интенсивности к изменению напряжения на электродах и тока в разряде

Давление P, Па		2	4	6	10
$\Delta J/\Delta U$	Синяя область спектра излучения	0,03	0,11	0,09	0,05
	Красная область спектра излучения	0,11	0,36	0,38	0,32
$\Delta J/\Delta I$	Синяя область спектра излучения	0,25	0,44	0,40	0,16
	Красная область спектра излучения	1,10	1,35	1,30	0,95

Выводы

1. Контроль стабильности регистрируемой фотодиодом интенсивности видимого излучения плазмы в сочетании с оперативным изменением объема технологической среды, прокачиваемой через межэлектродное пространство при работе вакуумной установки, может служить дополнительным способом мониторинга обеспечения воспроизводимости качества структурных изменений в обрабатываемых изделиях.

2. Разработанные устройства контроля стабильности интенсивности видимого излучения плазмы можно использовать как средства оперативного мониторинга при создании автоматизированной технологической среды для стабилизации качества изделий при разработке новых технологий обработки различных изделий в тлеющем разряде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tereshko, I.V. Self Organizing processes in metals by Low-energy ion beams / I.V. Tereshko, V.I. Khodyrev, E.A. Lipsky // Nucl. Instr. And Meth. In Physics Research NIMB. – 1993. – В 80/81. – Р. 115–117.
2. The formation of nanoclusters in metals by the low-energy ion irradiation / I.V. Tereshko [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2007. – V. 201. – Р. 8552–8556.
3. Nanostructural evolution of steel and titanium alloys exposed to glow discharge / I.V. Tereshko [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2007. – V. 261. – Р. 678–681.
4. Cell adhesion study of the titanium alloys exposed to glow discharge / V.Abidzina [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2007. – V. 261. – Р. 624–626.
5. Терешко, И.В. Эффект дальнего действия в материалах при низкоэнергетическом ионном облучении / И.В. Терешко // Вестн. Нижегород. ун-та. Серия «Физика твердого тела». – 1998. – Вып. 2. – С. 131–139.
6. Логвин, В.А. Упрочнение поверхностей деталей воздействием тлеющего разряда в вакууме / В.А. Логвин, Ж.А. Мрочек // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: материалы 12-го науч.-техн. семина. / Ассоциация технологов-машиностроителей Украины, Академия технологических наук Украины, Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, ООО «НПП Реммаш», Киевский национальный университет технологий и дизайна, Ассоциация инженеров-трибологов России, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Московский государственный открытый университет, машиностроительный факультет Белградского университета, Белорусский национальный технический университет. – Киев: Машиностроение, 2012. – С. 156–158.
7. Логвин, В.А. Формообразование поверхностей валов суперкалендров: монография / В.А. Логвин [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 191 с.
8. Логвин, В.А. Рациональное использование ресурса режущих инструментов – резерв повышения производительности / В.А. Логвин, Ж.А. Мрочек // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (г. Минск, 12–13 апр. 2011 г.). – Минск: Бизнесофсет, 2011. – С. 117–119.
9. Велихов, Е.П. Физические явления в газовой плазме / Е.П. Велихов, А.С. Ковалев, А.Т. Рахимов. – М.: Наука, 1987. – 159 с.
10. Козлов, Э.В. Изменения, вызванные низкоэнергетической плазмой в поверхностных слоях, и объёмные свойства металлов и сплавов / Э.В. Козлов, И.В. Терешко, Н.А. Попова // Известия вузов. Физика. – 1994. – № 5. – С. 127–140.
11. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
12. Кунченко, Ю.В. О глубине зоны модификации свойств (упрочнения) материалов облучением при $T \leq 100^\circ\text{C}$ низкоэнергетической плазмой тлеющего разряда / Ю.В. Кунченко, В.В. Кунченко, Г.Н. Картмазов // ФПФ ФПФ PSE. – 2009. – Т. 7. – № 1–2. – С. 46–53.
13. Бабад-Захряпин, А.А. Высокотемпературные процессы в материалах, поврежденных низкоэнергетическими ионами / А.А. Бабад-Захряпин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 115 с.
14. Каталог цветного стекла / под ред. В.В. Варгина. – М.: Машиностроение, 1967. – 63 с.
15. Пат. 10193 Респ. Беларусь, МПК C23C 14/38. Устройство для контроля интенсивности излучения плазмы тлеющего разряда / В.А. Логвин, В.П. Редько, А.В. Волченков, Е.В. Логвина, И.В. Терешко; заявитель Логвин Владимир Александрович (BY). – № u20130944; заявл. 18.11.13; опубл. 30.08.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 4. – С. 205.
1. Tereshko, I.V. Self Organizing processes in metals by Low-energy ion beams / I.V. Tereshko, V.I. Khodyrev, E.A. Lipsky // Nucl. Instr. And Meth. In Physics Research NIMB. – 1993. – В 80/81. – Р. 115–117.
2. The formation of nanoclusters in metals by the low-energy ion irradiation / I.V. Tereshko [et al.] // Surface and Coatings Technology. – 2007. – V. 201. – Р. 8552–8556.
3. Nanostructural evolution of steel and titanium alloys exposed to glow discharge / I.V. Tereshko [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2007. – V. 261. – Р. 678–681.
4. Cell adhesion study of the titanium alloys exposed to glow discharge / V.Abidzina [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B. Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2007. – V. 261. – Р. 624–626.
5. Tereshko, I.V. Long range effect in materials at low-energy ionic irradiation / I.V. Tereshko // *Bulletin of Nizhny Novgorod University. Series. "Solid State Physics"*. – 1998. – Issue 2. – pp. 131–139.

6. Logvin, V.A. Parts surfaces strengthening with impact of glow discharge in vacuum / V.A. Logvin, Zh.A. Mrochek // *Current Problems of Production and Repair in Industry and Transport: Proceedings of the XII-th Scientific Eng. Seminar* / Association of Technologists-Engineering Workers of the Ukraine, Academy of Engineering Works of the Ukraine, Bakul Institute of Super-Hard Materials of the Ukraine, Ukrainian State Academy of Railway Transport, PC "SRC Remmash", Kiev National University of Technology and Design, Association of Tribology Engineers of Russia, Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of RAS, Moscow State Open University, Engineering Faculty of Belgrade University, Belorussian National Technical University. – Kiev: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 156-158.
7. Logvin, V.A. *Shaping of Super-Calender Shaft Surfaces*: monograph / V.A. Logvin [et al.]. Mogilev: Belarus.-Russ. University, 2012. – pp. 191.
8. Logvin, V.A. Efficient use of cutter life – reserve for efficiency increase / V.A. Logvin, Zh.A. Mrochek // *Promising Directions in Technology Development of Engineering Techniques and Metal Machining*: Abstract of Reports of the Inter. Scientific Tech. Conf. (Minsk, April 12-13, 2011). – Minsk: Businessoffset, 2011. – pp. 117-119.
9. Velikhov, E.P. *Physical Phenomena in Gas Plasma* / E.P. Velikhov, A.S. Kovalev, A.T. Rakhimov. – M.: Science, 1987. – pp. 159.
10. Kozlov, E.V. Changes caused by low-energy plasma in surface layers and volume properties of metals and alloys / E.V. Kozlov, I.V. Tereshko, N.A. Popova // *College Proceedings. Physics*. – 1994. – No. 5 – pp. 127-140.
11. Reiser, Yu.P. *Gas Discharge Physics* / Yu.P. Reiser. – M.: Science, 1987. – pp. 592.
12. Kunchenko, Yu.V. *On Depth of Modification Area of Material Properties (Strengthening) by Irradiation at $T \leq 100^\circ\text{C}$ of Low-Energy Plasma of Glow Discharge* / Yu.V. Kunchenko, V.V. Kunchenko, G.N. Kartmazov // FIP PSE. – 2009. – Vol. 7. – No. 1–2. – pp. 46–53.
13. Babad-Zakhryapin, A.A. *High-Temperature Processes in Materials Damaged by Low-energy Ions* / A.A. Babad-Zakhryapin. – M.: Energoatomizdat, 1985. – pp. 115.
14. *Catalogue of Color Glass* / under the editorship of V.V. Vargin. – M.: Mechanical Engineering, 1967. – pp. 63.
15. Pat. 10193 Republic Belarus IPC C23C 14/38. *Device for Control of Glow Discharge* / V.A. Logvin, V.P. Redko, A.V. Volchenkov, E.V. Logvina, I.V. Tereshko: applicant Logvin Vladimir Alexandrovich (BY). – No. u20130944; applied 18.11.13; published 30.08.14 // Official Bull. / National Center of Intellectual Property. – 2014. – No.4. – pp. 205.

Статья поступила в редколлегию 13.09.17.

Рецензент: д.т.н., профессор
Куликов М.Ю.

Сведения об авторах:

Логвин Владимир Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусско-Российского университета, e-mail: logvinvladim@yandex.ru.

Терешко Ирина Васильевна, к.физ.-мат.н., доцент кафедры «Физика» Белорусско-Российского университета, e-mail: iter41@mail.ru.

Редько-Бодмер Влада Всеволодовна, к.т.н., доцент кафедры «Технология продукции обществен-

ного питания и мясопродуктов» Могилевского государственного университета продовольствия, e-mail: vso@tut.by.

Шептунов Сергей Александрович, д.т.н., профессор, директор Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: ship@ikti.org.ru.

Logvin Vladimir Alexandrovich, Can. Eng., of the Dep. "Machine-Tools and Tools", Belorussian-Russian University, e-mail: logvinvladim@yandex.ru.

Tereshko Irina Vasilievna, Can. Physico-Math., Assistant Prof. of the Dep. "Physics", Belorussian-Russian University, e-mail: iter41@mail.ru.

Redko-Bodmer Vlada Vsevolodovna, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Technology of Catering Produce and Meat Foods, Mogilyov State University of Foodstuffs, e-mail: vso@tut.by.

Sheptunov Sergey Alexandrovich, D. Eng., Prof. Director of Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: ship@ikti.org.ru.

УДК 004.5

DOI: 10.12737/article_59cd76211ce3e7.64148055

С.А. Шептунов, Р.И. Кулиев, Т.И. Кулиев, Р.С. Нахушев, Р.И. Закиров, А.О. Шевхужев

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ И ПРИМЕРЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Проведен обзор современных человеко-машинных интерфейсов (ЧМИ) и даны примеры их использования в современном мире. Приведены технические характеристики устройств, используемых в интерфейсах.

Ключевые слова: человеко-машинный интерфейс, виртуальная реальность, магнитные наночастицы, электрическое поле.

S.A. Sheptunov, R.I. Kuliev, T.I. Kulive, R.S. Nakhushhev, R.I. Zakirov, A.O. Shevkhuzhev

BASIC DIRECTIONS IN DEVELOPMENT OF MAN-MACHINE INTERFACES AND EXAMPLES OF THEIR USE

Man-machine interfaces are already widely used in various fields of human activities. The development of interfaces and technologies corresponding to them and also information technologies is supported by state target programs.

This paper reports the introduction into the subject of natural-intuitive interaction with a computer, a review of modern man-machine interfaces existing

now and examples of their use in this world. Basic concepts of a natural-intuitive interface the advantages of its application, hardware support are considered. The review of means and tools of man-machine interfaces is carried out.

Key words: man-machine interface, virtual reality, magnetic nano-particles, electric field.

Человеко-машинный интерфейс (ЧМИ) - это набор технических средств, предназначенных для обеспечения непосредственного двустороннего взаимодействия между оператором и оборудованием, дающий оператору возможность управлять оборудованием и контролировать его функционирование.

Проектирование ЧМИ включает в себя следующие шаги:

1. Создание рабочего места: пульта управления, кресла, стола, приборов и органов управления.
2. Взаимодействие оператора с органами управления.

ЧМИ, основанные на видеокамерах

Одним из примеров является камера от компании *Creative* (рис. 1а). Она содержит два встроенных микрофона, позволяющих распознавать речь, встроенные ин-

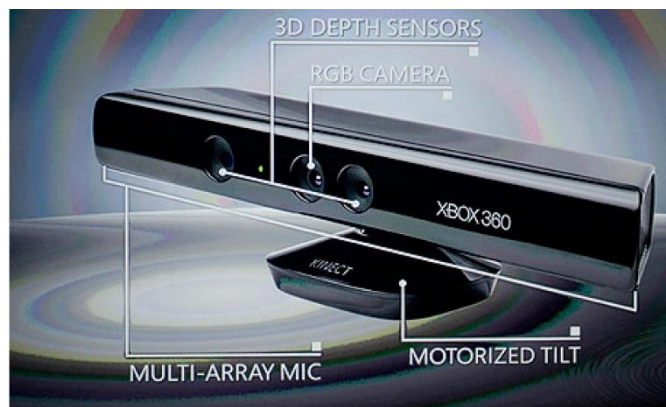
Основные типы человеко-машинных интерфейсов:

1. ЧМИ, основанные на видеокамерах.
2. Нейрокомпьютерный интерфейс.
3. ЧМИ, основанные на технологиях виртуальной реальности.
4. ЧМИ, основанные на тактильной обратной связи.
5. Магнитные интерфейсы на основе магнитных наночастиц.
6. Трехмерные ЧМИ, основанные на анализе изменения электрического поля.

фрактасную и RGB камеры, предназначенные для распознавания жестов на большом расстоянии.



а)



б)

Рис. 1. Камеры от компаний *Creative* и *Kinect*

Еще один пример - бесконтактный контроллер *Kinect* (рис. 1б), который разработан фирмой Microsoft. Этот контроллер состоит из двух сенсоров глубины, цветной видеокамеры и микрофонной решетки и позволяет пользователю взаимо-

действовать с приставкой Xbox или ПК под ОС Windows через устные команды, позы тела и показываемые объекты или рисунки. Сравнительная характеристика камер от компаний *Creative* и *Kinect* приведена в таблице.

Таблица

Технические характеристики камер от компаний *Creative* и *Kinect*

Характеристика	<i>Creative</i>	<i>Kinect</i>
Размеры, см	3,3x11,3	7,6x27,0
Количество камер	2	3
Микрофон	Есть	Есть
Дистанция, м	От 0,15 до 1,0	От 1,2 до 3,0

Области применения ЧМИ, основанных на видеокамерах:

1. Моделирование системы захвата, перемещения трехмерного виртуального объекта.
2. Распознавание жестов.
3. Распознавание лица и контрольных точек на лице.
4. Распознавание объектов реального мира и комбинирование их с виртуальным миром.

Нейрокомпьютерный интерфейс, или интерфейс «мозг - компьютер» (ИМК), - это технология, позволяющая обрабатывать электрические сигналы с коры головного мозга, усиливать и передавать их на компьютер. Далее с помощью алгоритмов обработки происходит синхронизация с любым управляющим

устройством или компьютерным приложением.

Биопотенциалы, используемые в системах ИМК:

1. Инвазивные - регистрируются с поверхности скальпа.
2. Неинвазивные - регистрируются непосредственно с коры головного мозга или от нейронов глубинных структур мозга.

Наиболее известная разработка в данной области принадлежит М.А.Л. Николелису и его команде. Они создали интерфейс, который позволял регистрировать активность нейронов в лобных и теменных областях мозга обезьяны и использовать их для управления механической рукой.

Нейрофизиологи Северо-Западного университета (США) создали систему, позволяющую обезьянам действовать па-

рализованной рукой. Для этого проводилась запись сигналов, посылаемых мозгом в руку, по которым после дешифровки восстанавливались команды, подаваемые мышцам.

ЧМИ, основанные на виртуальной реальности

Oculus Rift - шлем виртуальной реальности (HMD). Его задача - погрузить пользователя в мир виртуальной реальности и заставить его поверить в то, что этот мир реален. С каждой новой версией он все лучше справляется с этой задачей.

Не выходя из дома, человек может виртуально оказаться в любом месте. При использовании шлема пользователю становятся доступны все самые яркие переживания. Вы можете покататься на аттракционах, почувствовать, что ощущает лётчик, делая «мёртвую петлю», и т. д. Производители утверждают, что на данный момент реализована лишь небольшая часть возможностей шлема.

HTC Re Vive - первый шлем, разработанный HTC вместе с Valve (рис. 2а). В

Также создан действующий прототип системы управления роботом *Pioneer 2AT*. Программа позволяет преобразовывать мысленные образы в управляющие команды для робота.

работе используются два экрана с разрешением 1080x1200 и частотой обновления 90 герц. Также в устройстве имеется множество датчиков, в частности лазерные датчики позиционирования, акселерометр, гироскоп MEMS. Вместе со шлемом используются два ручных контроллера, а для точного отслеживания положения применяются две внешние станции *Lighthouse*.

Project Morpheus - шлем виртуальной реальности для PS4 (рис. 2б). Для работы он использует *PlayStation Camera* и контроллер *DualShock 4*. В шлеме нет встроенной гарнитуры, и для вывода звука придется использовать или стереосистему, подключенную к консоли, или беспроводную гарнитуру *Sony*.



а)



б)

Рис. 2. Шлемы виртуальной реальности: а - *HTC Re Vive*; б - *Project Morpheus*

Имитаторы - симуляторы реальности. Это различного вида тренажеры, применяемые для обучения вождению (от автомобиля до самолета), а также в различных аттракционах. В простейшем случае могут использоваться шлемы/очки с подвижным сиденьем и дополнительными органами управления. Для виртуального вождения лучше подходит имитация кабины автомобиля/танка/самолета и т.п. с дисплеями вместо окон.

На данный момент самыми совершенными системами виртуальной реальности являются проекционные системы, выполненные в компоновке комнаты виртуальной реальности. Такая система представляет собой помещение, на все стены которого проецируется стереоизображение. Положение пользователя, повороты его головы, направление взгляда отслеживаются системой, что позволяет добиться максимального эффекта погружения.

Инженерами Гонконгского политехнического университета разработан миниатюрный робот, который позволяет провести хирургическую операцию всего через один разрез. Но основное его достоинство - функция тактильной обратной связи, позволяющая врачу, управляющему роботом, ощутить твердость тканей, с которыми работает робот.

Еще одно применение - экзоперчатки. Самая известная - экзоперчатка *Dexto*. Встроенный датчик ориентации отслеживает перемещение руки. В последней версии перчатка *Dexto* способна отслеживать движение всех пяти пальцев руки, но на данный момент можно почувствовать только, коснулись ли предмета или нет. Компания работает над тем, чтобы пользователь мог определять различную жесткость виртуальных предметов. Перчатка *Dexto* может использоваться для распознавания языка жестов и обучения игре на музыкальных инструментах.

Группа исследователей Токийского института технологий объявила о создании специального аппарата, способного идентифицировать и переводить аромат в цифровую форму. Это устройство пока не получило названия и еще совершенствуется. Существующий на сегодняшний день наиболее совершенный вариант аппарата нельзя назвать мобильным или портативным, поскольку в длину он составляет около метра. Устройство распознает аромат с помощью 15 сенсоров, а

затем переводит его в цифровой формат. Перевод запаха из цифрового в настоящий возможен благодаря тому, что в состав аппарата включены также 96 отдельных стеклянных бутылочек, содержащих различные химические ингредиенты. Когда поступает входящий цифровой сигнал, машина смешивает элементы и начинает «благоухать».

Как отмечают разработчики, существует и более компактный вариант устройства, но он включает в себя только сенсоры-распознаватели, не способные к точному воспроизведению аромата.

Система *AIREAL* основана на аэродинамическом эффекте - образовании устойчивого тороидального вихря на выходе из воздушной камеры с круглым отверстием при резком повышении давления внутри. Такое устройство называют «вихревая пушка». Для передачи пользователю тактильных ощущений в системе используются пять мембран, которые работают как диффузоры низкочастотных динамиков. Каждая из мембран способна генерировать до нескольких десятков импульсов в секунду, что создает эффект легких прикосновений. Изменяя частоту и силу сигналов, можно сгенерировать тактильные ощущения от прикосновений к различным поверхностям. Использовать систему *AIREAL* можно в играх и интерфейсах общего назначения.

Интерфейсы на основе магнитных наночастиц

Наночастицы (рис. 3) могут быть совместимы с биологическими объектами и участвовать в решении медицинских задач. Сравнение размеров дает идею использования наночастиц в качестве маленьких зондов, позволяющих регистрировать ход клеточных процессов, не влияя на их протекание. Для «неразрушающего контроля» они должны быть покрыты биологическими молекулами, чтобы взаимодействовать или связываться с биологическими объектами.

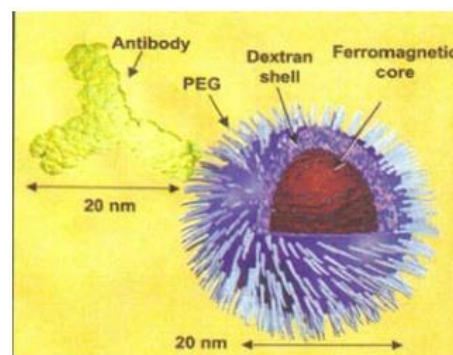


Рис. 3. Магнитная наночастица

Магнитные свойства наночастиц определяются многими факторами, среди которых следует выделить химический со-

став, тип кристаллической решетки и степень ее дефектности, размер и форму частиц, морфологию (для частиц с комплексной структурой), взаимодействие частиц с окружающей их матрицей и соседними частицами. Изменяя размеры, форму, состав и строение наночастиц, можно в определенных пределах управлять магнитными характеристиками материалов на их основе [1].

Важным фактором при рассмотрении использования наночастиц для медицинских приложений является то, что они имеют управляемые размеры в пределах от единиц до сотен нанометров, что сопоставимо с размерами внутриклеточных биологических объектов, вирусов, протеинов, генов и т.д.

Если речь идет об интерфейсе на основе магнитных наночастиц, то в качестве возможного варианта следует рассмотреть их использование для усиления сигналов нейронов.

Наночастицы вводят в организм человека внутривенно с помощью шприца или инъектора, тщательно рассчитывая дозу и скорость введения препарата. Формируясь в структуры на нервных окончаниях, они скапливаются вокруг источников маг-

нитного поля (нейронов). Правильно структурируя наночастицы, можно будет различать между собой модулированные сигналы. Таким образом, наша технология будет работать в режиме двухсторонней передачи данных. Мы сможем получать сигналы и понимать, как себя ведут отдельные части тела. По сути, это метод бесконтактного воздействия (связи).

Преимущество использования магнитных наночастиц перед различного рода чипами состоит в том, что они не имеют встроенного источника энергии. Электрический ток, индуцированный в магнитные наночастицы электромагнитным сигналом от считывателя, обеспечит достаточную мощность для функционирования наночастиц и передачи ответного сигнала.

Приведем пару вариантов использования описанного метода.

Так, при магнитно-резонансной томографии наночастицы могут быть применены как агенты МРТ-контраста.

При снятии энцефалограммы можно использовать магнитные наночастицы для усиления (резонирования) магнитного поля головного мозга. Таким образом, мы имеем возможность исследовать функциональное состояние всего организма.

Трехмерные ЧМИ, основанные на анализе изменения электрического поля

Появление систем, основанных на анализе изменений электрического поля, обозначило важную тенденцию перехода от простого обнаружения движения к распознаванию последовательностей движений как определенных жестов.

В этом новом классе НМИ движение руки в пределах объема, расположенного над двухмерным массивом датчиков, вызывает искажения электрического поля, измеряемые специальным приемным устройством. Использование электрических датчиков вместо видеокамер открывает дорогу к созданию встраиваемых приложений для распознавания движений, которые смогут применяться практически во всех отраслях – от автомобильной и аэрокосмической промышленности до бытовой техники.

С наиболее впечатляющим образцом этого нового класса устройств в ноябре

2012 года дебютировала компания Microchip Technology, представив микросхему MGC3130, выполняющую полный набор функций распознавания 3D-жестов, основанных на технологии *GestIC*. Подключаемое к комплекту недорогих внешних электродов устройство *GestIC* содержит аналоговую цепочку обработки сигналов, измеряющую вызываемые движением рук изменения электрического поля и распознающую перемещение рук в трехмерной области над электродами. Затем с помощью встроенного в кристалл сигнального процессора выполняется цифровая обработка информации, чтобы определить, какому из приблизительно дюжины предварительно запрограммированных жестов соответствуют зафиксированные перемещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов, А.А. Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза / А.А. Баранов, С.П. Губин. - М.: Нанометр, 2009.
 2. Губин, С.П. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства / С.П. Губин, Ю.А. Кокшаров, Г.Б. Хомутов, Г.Ю. Юрков // Успехи химии. - 2005. - № 6. - С. 539-574.
 3. Никифоров, В.Н. Медицинские применения магнитных наночастиц / В.Н. Никифоров // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. - М.: Научтехлитиздат, 2013. - №1. - С. 84-93.
 4. Афонина, А.Р. Виртуальная реальность. Неизбежное будущее виртуальной реальности / А.Р. Афонина, А.В. Сарафанова, Е.В. Бердникова // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова. - Саратов, 2016. - С. 14-18.
 5. Макаров, Д.Е. Человеко-машинный интерфейс. Базовые принципы построения / Д.Е. Макаров, И.С. Алексеев // Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине. - Томск, 2014. - С. 58-60.
 6. URL: <http://xexe.club/95398-robot-hirurg-polnostyu-pomeschaetsya-v-tele-pacienta.html>.
 7. URL: http://pcnews.ru/news/dexmo_ekzopercatka_s_taktilnoj_obratnoj_svazu-577378.html.
1. Baranov, A.A. *Magnetic Nano-Particles: Achievements and Problems of Chemical Synthesis* / A.A. Baranov, S.P. Gubin. - M.: Nanometer, 2009.
 2. Gubin, S.P. Magnetic nano-particles: methods of obtaining, structure and properties / S.P. Gubin, Yu.A. Koksharov, G.B. Khomutov, G.Yu. Yurkov // *Chemistry Successes*. - 2005. - No. 6. - pp. 539-574.
 3. Nikiforov, V.N. *Medical Application of Magnetic Nano-Particles* / V.N. Nikiforov // *Proceedings of Prokhorov Academy of Engineering sciences*. - M.: Nauchtechlitizdat, 2013. - No. 1. - pp. 84-93.
 4. Afonina, A.R. Virtual reality. Unavoidable future of virtual reality / A.R. Afonina, A.V. Sarafanova, E.V. Berdnova // *Proceedings of the All-Russian Scientific Practical Conf. Vaviliv State Agricultural University of Saratov*. - Saratov, 2016. - pp. 14-18.
 5. Makarov, D.E. Man-machine interface. Basic principles of structure/ D.E. Makarov, I.S. Alexeyev // *Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine*. - Tomsk, 2014. - pp. 58-60.
 6. URL: <http://xexe.club/95398-robot-hirurg-polnostyu-pomeschaetsya-v-tele-pacienta.html>.
 7. URL: http://pcnews.ru/news/dexmo_ekzopercatka_s_taktilnoj_obratnoj_svazu-577378.html.

Статья поступила в редколлегию 13.09.17.

Рецензент: д.т.н., профессор

Куликов М.Ю.

Сведения об авторах:

Шептунов Сергей Александрович, д.т.н., профессор, директор Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: ship@ikti.ru.

Кулиев Расул Ибрагимович, аспирант Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: kulras@mail.ru.

Кулиев Таусо Ибрагимович, аспирант Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: tauso@mail.ru.

Sheptunov Sergey Alexandrovich, D. Eng., Prof., Director of the Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: ship@ikti.ru.

Kulie Rasul Ibragimovich v, Post graduate student, the Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: kulras@mail.ru.

Kuliev Tauso Ibragimovich, Post graduate student, the Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: tauso@mail.ru

Нахушев Рахим Суфьянович, аспирант Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: electronics_rm@mail.ru.

Закиров Ринат Исхакович, аспирант Института конструкторско-технологической информатики РАН, e-mail: rinatzakirovv@mail.ru.

Шевхужев Астемир Османович, аспирант Института конструкторско-технологической информатики РАН.

Nakhushhev Rakhim Sufiyanovich, Post graduate student, the Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: electronics_rm@mail.ru.

Zakirov Rinat Iskhakovich, Post graduate student, the Institute of Design-Technological Informatics of RAS, e-mail: rinatzakirovv@mail.ru.

Shevkhuzhev Astemir Osmanovich, Post graduate student, the Institute of Design-Technological Informatics of RAS.

Металлургия и материаловедение

УДК 669.1

DOI: 10.12737/article_59cd75f7e8b363.24143847

Г.Г. Бурый

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОДБОРА МОДИФИКАТОРА ЧУГУНА

Рассмотрен процесс подбора модификатора чугуна. Приведены теоретические исследования о модификаторах чугунов, их влиянии на образование графита. Представлено влияние модификаторов на химический состав, форму графита и свойства чугунов. Приведены зависимости, позволяющие

подбирать модификаторы, изменяющие долю и вид графита в чугуне, в зависимости от требуемых свойств чугуна.

Ключевые слова: чугун, модификатор, металлургия, процесс подбора, графит.

G.G. Bury

PERFECTION OF CAST IRON MODIFIER SELECTION PROCESS

The paper reports cast iron modification with the purpose of globular graphite formation in it. It is possible at the formation a barrier round a primary crystal. The barrier formation is possible at the definite characteristics of modifiers. Such characteristics are a small coefficient of addition distribution in a modified phase and an element solvability in an alloy liquid basis –austenite. On the basis of these parameters there was formed a diagram where into a rectangle the most suitable modifiers fall for the production of globular graphite. There were also carried out additional researches of elements for the cast iron modification which have shown the strongest impact upon the globular graphite shape formation of element Eu. In the paper the interaction of the modifier introduced and the fixed carbon content is presented. Besides, in the paper the values of hardness according to Vickers method

and the values of strength limits at the cast iron modification with some elements are shown. For the purpose of the reliability assurance of parts operation at different loads it is necessary that a quantitative connection should be established between a graphite form, dispersion degree and mechanical properties. The paper reports the analyzed parameter of “graphite inclusion form factor” combining in itself such factors as a graphite form, dispersion degree and mechanical properties. The dependence for the definition of a graphite volume part in cast iron is presented. The paper reports the equations of regression which could be used for the assessment of structure factors impact upon a breaking point, impact elasticity and relative elongation after hardening and HF tempering.

Key words: cast iron, modifier, selection process, graphite.

Введение

Основными направлениями повышения механических свойств чугунов, из которых изготавливаются автомобильные детали, являются разработка методов воздействия на их жидкое состояние и оптимизация составов. При эвтектической кристаллизации двух различных фаз модифицирующее воздействие на каждую из них осуществляется различными модификато-

рами, так как маловероятно, чтобы один и тот же элемент одинаково эффективно воздействовал на обе фазы. При эвтектической кристаллизации чугуна по стабильной системе мы имеем дело с двумя основными фазами - аустенитом и графитом. В данной работе рассмотрено модифицирование только графита, направленное на получение его в сфероидальной форме.

Подбор модификатора чугуна

Для придания первичному кристаллу округлой формы модификатор должен интенсивно образовывать в жидкой фазе барьер около его поверхности за счет избирательной кристаллизации. Условиями этого являются: возможно, малый коэффи-

циент распределения добавки в модифицируемой фазе ω (отношение растворимостей в твердом и жидком состояниях при температуре кристаллизации этой фазы); нахождение растворимости добавки в жидкой основе сплава в определенном ин-

тервале (слишком малая растворимость не позволит ввести добавку в сплав, а слишком большая вызовет диффузионное рассеяние барьера).

Для реализации указанного подхода необходимо располагать хотя бы приближенными значениями растворимостей элементов периодической системы в твердой и жидкой модифицируемой фазе. Если для Si такие экспериментальные и расчетные данные имеются, то для углерода они практически отсутствуют. Для их определения в соответствии с принципами синтеза сплавов было проведено прогнозирование этих величин, основанное на аналогии закономерностей растворимости элементов периодической системы. На рисунке [1-4; 8] показана окончательная диаграмма для выбора модификаторов графита в чугунах. По вертикали отложены величины коэффициентов распределения элементов в углероде, по горизонтали - растворимости элементов в жидкой основе сплава (аустените $\delta_{\gamma-Fe}$). Ввиду очень больших диапазонов изменения этих величин обе построены в логарифмическом масштабе. Каждый элемент в плоскости изображается

в виде точки, около которой стоит соответствующий символ [1-4; 8].

Все известные сфероидизирующие модификаторы графита в чугуне собрались в виде компактной группы, выделенной четырехугольниками. Внутренний четырехугольник объединяет наиболее сильные модификаторы: Mg, Y, Ce, La, Gd. В литературе практически отсутствуют данные о сфероидизирующем влиянии на графит Gd. Поэтому проведены специальные эксперименты, подтвердившие указанное влияние Gd на форму графита в чугуне. Во внешнем прямоугольнике располагаются элементы: Te, Zr, In, Ti, Sc, Ca, Ba, Sr.

Последние могут служить слабыми сфероидизаторами. Таким образом, условия сфероидизирующего действия элементов на графит в чугуне можно записать в виде $\omega=10^{-8}/10^{-9}$ и $\delta_{\gamma-Fe}=10^{-1}/10^{-2}$. Полученные результаты совершенно четко показывают, что эффект сфероидизации определяется созданием соответствующими модификаторами барьера в жидкой фазе на границе кристаллов графита в процессе их роста [1-4; 8].

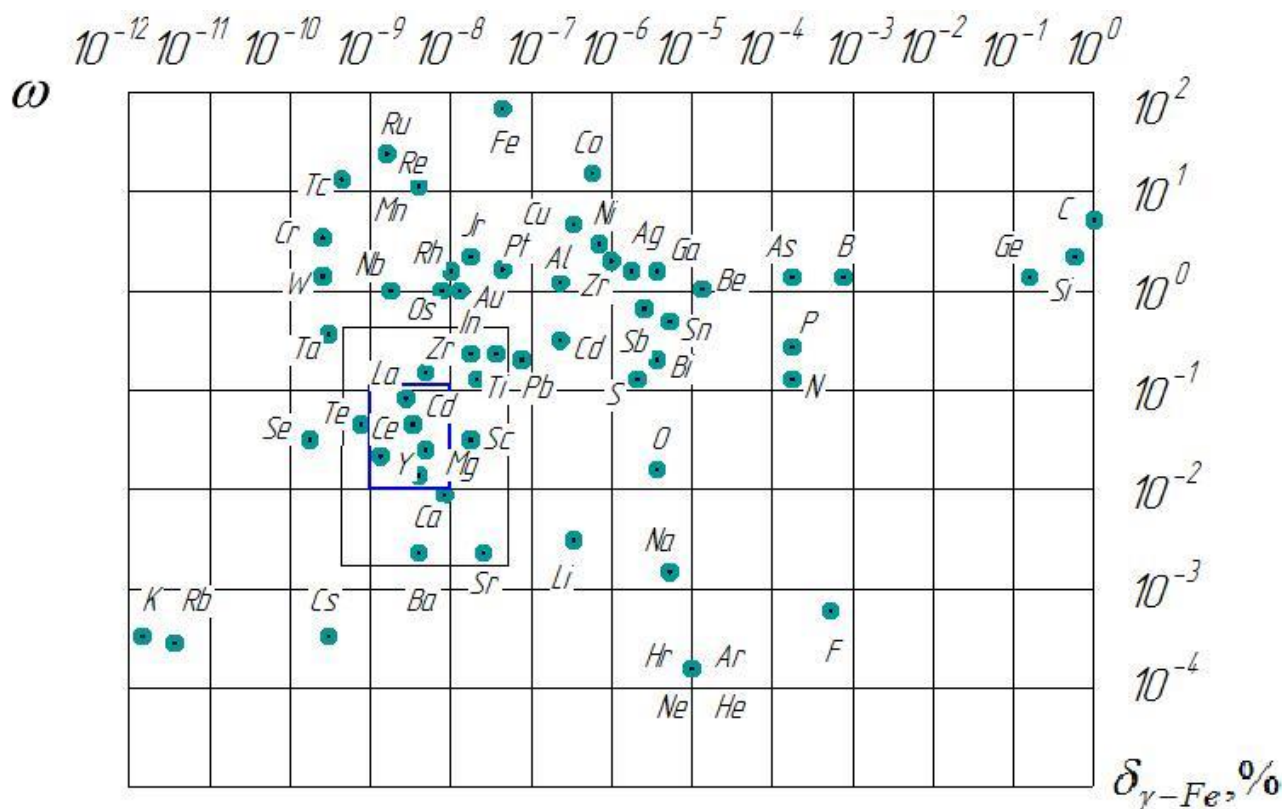


Рис. Диаграмма для выбора модификаторов графита в чугунах

Подтвержден и расширен список сфероидизаторов графита в чугунах. Исследовали модифицирование металла Ce, Dy, Er, Eu, Tb, Ho, Gd, La, Nd, Pr, Sm, Y и Yb, восстановленными из их окислов. Установлено, что степень сфероидизации графита металла максимальна (80%) при модифицировании Eu и минимальна (6%) при модифицировании Yb.

Компактные формы графита достигают 44% при модифицировании Tm, а минимум (всего 8%) данных форм наблюдается при модифицировании чугуна Eu. Наибольшее суммарное количество шаровидного графита (88%) - при модифицировании Eu, минимальное (36%) - при модифицировании Sm. Таким образом, наибольшее сфероидизирующее действие на графит металла оказывают Eu и Pr, в значительно меньшей степени это действие проявляется при модифицировании Dy, Nd, Cd, Tb и La (-50% шаровидного графита), а при модифицировании Er, Ho, Tm, Y, Sm и Yb степень сфероидизации графита соответственно равна 38, 34, 33, 22, 18 и 6%. При модифицировании Eu графит в основном шаровидный, мелкий и равномерно распределен по сечению.

В случае модифицирования Ce размеры включений графита значительно возрастают, распределены они менее равномерно. Количество шаровидного графита уменьшается. При модифицировании Yb размер графитовых включений примерно одинаков с размером графита при модифицировании металла Ce, но шаровидного графита очень мало [1-4; 8].

Полученные результаты подтверждают теоретическое предположение возможности восстановления редкоземельных металлов (РЗМ) из их окислов, так как установлено их сфероидизирующее действие на графит металла. Химический состав металла показывает, что десульфурующая способность всех РЗМ одинакова (остаточное содержание S - 0,01%), кроме Eu (0,008%) и Pr (0,009%). На усвоение Al в металле РЗМ практически не влияют (в наплавках 0,2-0,27% Al). В зависимости от применяемого окисла РЗМ содержание в металле C, Si и Mn изменяется в небольших пределах. Так, содержание углерода

максимально при вводе в порошковую проволоку окисла Pr (3,34% C) и минимально при вводе окисла Y (3,1% C); содержание Si достигает 2,8% при вводе окисла Si и снижается до 2,37% при вводе окисла Nd; содержание Mn максимально при вводе окисла Tb (0,49% Mn) и минимально при вводе Er (0,38% Mn). Особенно значительно изменяется содержание в металле Eu и связанного углерода в зависимости от применяемого окисла РЗМ. Так, содержание в металле связанного углерода при вводе окисла Eu составляет всего 0,06%, а при вводе окисла Y - 1,79%. Количество P в металле минимально (0,026%) при вводе окисла Gd и максимально (0,04-6%) при вводе окисла Pr. Количество Ce изменяется от 3,91% при вводе окисла Dy до 4,11% при вводе окисла Pr. Таким образом, металл во всех случаях представляет собой доэвтектический чугун [1-4; 8].

Микротвердость цементита составляет HV 570 при модифицировании Eu и HV 835 при модифицировании Y. Микротвердость перлита минимальна (HV 282) при модифицировании Eu и максимальна (HV 401) при модифицировании Y. Микротвердость феррита изменяется от HV 197 при модифицировании Eu до HV 246 при модифицировании Ce. Твердость металла минимальна (HV 202) при модифицировании Eu и максимальна (HV 429) при модифицировании Y. Твердость зоны сплавления изменяется от HV 210 при модифицировании Tm до HV 450 при модифицировании Sm [1-4; 8].

Наиболее высокое значение предела прочности металла обеспечивается при модифицировании Gd, Tm, Ce (470 МПа), самое низкое значение (414 МПа) - при модифицировании Y. Предел прочности металла максимальный (400 МПа) при модифицировании Sm, а минимальный (320 МПа) - при модифицировании Ho. Ударная вязкость достигает $2,1 \cdot 10^5$ Дж/м² при модифицировании Yb и имеет минимальное значение $0,35 \cdot 10^5$ Дж/м² при модифицировании Sm.

Относительное сужение максимально (8,05%) при модифицировании Tm и минимально (1%) при модифицировании Tb. Относительное удлинение максимально

(6,5%) при модифицировании Eu и минимально (0,2%) при модифицировании Yb. Таким образом, после термообработки пластические показатели значительно улучшаются при относительно небольшом уменьшении показателей прочности, поэтому термообработка при модифицировании металла РЗМ, восстановленными из их окислов, целесообразна всегда.

Таким образом, результаты модифицирования металла РЗМ, восстановленными из их окислов, хорошо согласуются с

известными данными модифицирования чугуна в условиях литейного производства. По возрастающей глобуляризирующей способности РЗМ можно расположить в ряд: Yb, Sm, Y, Tm, Ho, Er, La, Tb, Gd, Nd, Dy, Ce, Pr, Eu. Карбидостабилизирующее действие проявляют Yb, Gd, La и Y, а ферритизирующее - Er, Pr, Tb, Nd, Ho, Dy, Sm, Ce, Eu, что хорошо согласуется с их соответствующим влиянием на количество связанного углерода [1-4; 8].

Влияние модификаторов на свойства чугуна

В отливках из высокопрочного чугуна (ВЧ) с шаровидным графитом наблюдаются колебания содержания магния и серы, поэтому в их структуре трудно получить включения графита только шаровидной формы. В структуре отливок может присутствовать графит вермикулярной, звездообразной, разорванной и других форм. Такая неоднородность формы графитных частиц приводит к снижению механических свойств чугуна. С целью обеспечения надежности работы литых деталей, особенно в сложных условиях нагружения и изнашивания, необходимо установить количественную связь между формой графита, степенью дисперсности и механическими свойствами деталей. Фактор формы графитных включений Φ определяли сравнением с эталонными формами. Каждому значению Φ соответствуют два варианта, учитывающие шаровидную (Ш) и вермикулярную (В) формы графита в исследованных образцах. Обобщенный фактор формы рассчитывали с учетом доли каждой из форм графита [5-7]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^2 \Phi_i q_i,$$

где Φ - фактор формы включений графита (для графита шаровидной формы $\Phi = 1$, а вермикулярной - $\Phi = 0,2...0,5$ в зависимости от расположения его колоний и их размеров); q - объемная доля графита каждой из форм в структуре ВЧ [5-7].

Объемную долю графита, соответствующую каждой из форм мартенсита, определяли одновременно методом точек

на травленном шлифе при увеличении в 100-200 раз. Относительная ошибка измерения при вероятности 50% составляла менее 10%. Расчетную объемную долю графита Γ (%) определяли по известному уравнению [5-7]

$$\Gamma = (\%C - 0,8П) \cdot 7,86 / 2,16,$$

где % C - массовая доля углерода в ВЧ; 0,8П - содержание углерода в перлите; 7,86 и 2,16 - плотность матрицы и графита соответственно, г/см³ [5-7].

После закалки и отпуска ВЧ его механические свойства существенно зависят от фактора формы, особенно ударная вязкость и относительное удлинение. При увеличении фактора формы Φ от 0,43 до 0,98 все исследованные механические свойства повышаются. Пластичность матрицы невысока, что связано с влиянием фактора формы графита, который определяется количеством графита В и характером его расположения в структуре матрицы. Максимальное влияние графита В проявляется, когда его колонии в объеме матрицы расположены неравномерно и $\Phi = 0,43$. Вследствие этого в структуре отливок деталей должно содержаться не более 30 % графита В [5-7].

Влияние структурных составляющих ВЧ на механические свойства отливок оценивали методом корреляционного анализа данных (ЭВМ типа ЕС-1020). Получены уравнения регрессии, которые можно использовать для оценки влияния структурных факторов на предел прочности σ , ударную вязкость α и относительное удлинение γ после закалки и отпуска ВЧ [5-7]:

$$\sigma = 1067 + 0,81\Pi - 0,35B, \quad (1)$$

$$\alpha = 12 + 0,091\Pi - 0,073B, \quad (2)$$

$$\gamma = 1,1 + 0,032\Pi - 0,016B. \quad (3)$$

Заключение

Из уравнений (1), (2) и (3) следует, что необходимые свойства можно получить путем изменения значения Φ . Таким образом, для получения после закалки и отпуска высоких свойств ($\sigma = 1300 \text{ Н/мм}^2$, $\alpha = 20 \text{ Дж/см}^2$, $\gamma = 2,2\%$) необходимо, что-

бы $\Phi = 0,98...1,0$, т.е. количество графита В должно быть не менее 10%. Это может быть достигнуто в каждом конкретном случае модифицированием жидкого чугуна [5-7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. - М.: Металлургия, 1978. - 392 с.
- Бурый, Г.Г. Использование математической модели для выбора модификатора чугуна / Г.Г. Бурый, В.П. Расщупкин, Н.Ф. Гребенкина / Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования: материалы IV Всероссий. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. - Омск: СибАДИ, 2009. - С. 115-116.
- Расщупкин, В.П. Сущность и особенности производства чугуна: учеб. пособие / В.П. Расщупкин, М.С. Корытов. - Омск: СибАДИ, 2007. - 28 с.
- Вегман, Е.Ф. Металлургия чугуна: учеб. для вузов / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев. - М.: Академкнига, 2004. - 774 с.
- Леонтьев, А.Н. Поверхностное модифицирование отливок из серого чугуна / А.Н. Леонтьев, В.П. Расщупкин, Ю.К. Корзунин, Н.В. Матвеева // Вестник СибАДИ. - 2007. - № 5. - С. 213-215.
- Акимов, В.В. Жидкий чугун - серый, белый, высокопрочный, ковкий, его свойства и структурные изменения / В.В. Акимов // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации : материалы междунар. конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ»: 67-я науч.-практ. конф. «Теория, методы проектирования машин и процессов в строительстве», посвящ. 100-летию со дня рождения засл. деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук, проф. Т. В. Алексеевой (с междунар. участием). - Омск: СибАДИ, 2013. - Кн. 2. - С. 19-22.
- Расщупкин, В.П. Производство стали. Методика выплавки: учеб. пособие / В.П. Расщупкин, М.С. Корытов. - Омск: СибАДИ, 2007. - 31 с.
- Гольдштейн, Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. - М.: Металлургия, 1986. - 272 с.
- Novikov, I.I. Theory of Metal Heat Treatment / I.I. Novikov. - M.: Metallurgy, 1978. - pp. 392.
- Bury, G.G. Simulator use in cast iron modifier choice / G.G. Bury, V.P. Rasshchupkin, N.F. Grebenkina / Development of road vehicle complex and building infrastructure based on efficient nature use: Proceedings of the IV-th All-Russian Scientific Practical Conf. of Students, Post graduate students and Young Scientists. - Omsk: Siberian RI, 2009. - pp. 115-116.
- Rasshchupkin, V.P. Essence and Peculiarities of Cast Iron Production: manual / V.P. Rasshchupkin, M.S. Korytov. - Omsk: Siberian RI, 2007. - pp. 28.
- Vegman, E.F. Cast Iron Metallurgy: college textbook / E.F. Vegman, B.N. Zherebin, A.N. Pokhvisnev. - M.: Academbook, 2004. - pp. 774.
- Leontiev, A.N. Grey iron casting surface modification / A.N. Leontiev, V.P. Rasshchupkin, Yu.K. Korzunin, N.V. Matveyeva // Bulletin of Siberian RI. - 2007. - No. 5. - pp. 213-215.
- Akimov, V.V. Liquid iron - grey, white, high-tensile, malleable iron, its properties and structural changes / V.V. Akimov // Architecture. Building Construction. Transport. Technologies. Innovations: Proceedings of the Inter. Congr. FSBEI HVE "SiberianRI": 67-th Scientific Practical Conf. "Theory, Methods of Machine and Processes Design in Building Construction" devoted to the 100-th Anniversary of Prof. T.V. Alexeyeva, Prof., Honored Worker of Science and engineering of the RF, D. Eng. (with international participation). - Omsk: Siberian RI, 2013. - Vol.2 - pp. 19-22.
- Rasshchupkin, V.P. Steel Production. Smelting Methods: manual / V.P. Rasshchupkin, M.S. Korytov. - Omsk: Siberian RI. 2007. - pp. 31.
- Goldstein, Ya, E. Modification and Micro-alloying of Steel and Cast Iron / Ya.E. Goldstein, V.G. Mizin. - M.: Metallurgy, 1986. - pp. 272.

Статья поступила в редколлегию 30.08.17.

Рецензент: д.т.н., профессор СибАДИ
Евстифеев В.В.

Сведения об авторах:

Бурый Григорий Геннадьевич, к.т.н., доцент кафедры «Автомобили, конструкционные материалы и технологии» Сибирского государственного авто-

мобильно-дорожного университета (СибАДИ), тел.: 8-913-621-92-33, e-mail: buryy1989@bk.ru.

Bury Grigory Gennadievich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Motor Vehicles, Construction Mate-

rials and Techniques", Siberian State Road University, e-mail: buryy1989@bk.ru.

Транспорт

УДК 629.4+681.518:658.512.01

DOI: 10.12737/article_59cd7506ab0e61.90627489

В.И. Воробьев, О.В. Измеров, М.А. Маслов

ВЫБОР ОБЪЕКТНОЙ МОДЕЛИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА ЛОКОМОТИВА

Рассмотрена задача выбора объектной модели технических решений механической части тягового привода локомотива. Предложена модель в виде иерархии множеств описаний при разной степени его схематизации и библиотеки описаний типовых объектов в виде иерархической структуры

функционального взаимодействия между элементами.

Ключевые слова: математическое моделирование, тяговый привод локомотива, автоматизация проектирования, объектная модель.

V.I. Vorobiev, O.V.Izmerov, M.A. Maslov

OBJECT MODEL OF LOCOMOTIVE TRACTION DRIVE

The problem of choice of object model technical solutions to the mechanical part of the traction drive of the locomotive. The proposed model in a hierarchy of sets of descriptions with varying degree of schematization and the library description of the model ob-

jects in a hierarchical structure of functional interaction between the elements.

Keywords: mathematical modeling, traction drive of the locomotive, design automation, the object model.

Внедрение САПР в процесс проектирования локомотивов пока не привело к соответствующему повышению качества проектных решений тягового привода. На электровозах ЭП1 и ЭП10 имели место случаи выхода из строя резинокордных муфт и узлов подвески редуктора [1] и узлов крепления тягового электродвигателя (ТЭД) к раме тележки [2]. На электровозе 2ЭС6 наблюдались излом поводка подвески ТЭД и выдавливание резины из шарниров подвески [3]. Интеграция ТЭД и осевого редуктора, примененная в приводе электровоза 2ЭС10, позволив повысить надежность, привела к общей нетехнологичности привода, повышению требований к точности из-за сложных размерных цепей и к росту трудоемкости ремонта. Эти результаты свидетельствуют о том, что слабым местом проектирования тяговых приводов на данный момент является моделирование их технических решений. Предлагаемая статья является попыткой решения указанной проблемы.

Анализ существующей методологии проектирования показал, что в настоящее

время имеется ряд методов конструирования [11; 12], основанных на моделях процесса проектирования, которые, согласно классификации [4], можно отнести к алгоритмическим моделям. Применению этих моделей в САПР препятствуют два обстоятельства. Во-первых, известные методики носят эмпирический характер, вследствие чего к настоящему времени предложено множество возможных алгоритмов поиска технического решения без однозначных критериев выбора наилучшего алгоритма. Во-вторых, данные алгоритмы рассчитаны на использование их человеком, вследствие чего не был рассмотрен вопрос о выборе типа модели технического решения для создания процедур связи с известными системами САПР.

В качестве общей методологической основы для моделирования технических решений тягового привода примем концепцию, изложенную С.В. Никитиным [5]. Согласно этой концепции, систему тягового привода можно представить пятеркой:

$$C = (\varphi, R, A^{(s)}, A^{(Rs)}, A^{(sR)}), \quad (1)$$

где множество $\varphi = \{S_1 \dots S_p\}$ – состав системы ($S_1 \dots S_p$ – внутренние элементы C); множество $R = \{R_1 \dots R_q\}$ – окружающая среда (надсистема) ($R_1 \dots R_q$ – внешние элементы C), множество $A^{(s)}$ – все n -арные соотношения на элементах (внутренняя структура системы C), а множества $A(sR)$ и $A(Rs)$ – все n -арные соотношения между элементами множеств φ и R (структура связи взаимодействия систем со средой).

Отсюда модель тягового привода – это система из множеств описаний реальных объектов множества. При этом отображение $\alpha: \varphi' \rightarrow \varphi$ считается гомоморфным отображением множества реальных объектов $\varphi' = \{S'_1 \dots S'_p\}$ на множество их описаний $\varphi = \{S_1 \dots S_p\}$, если φ имеет тот же состав, что и множество φ' . Соответственно отображение системы $C' = C(\varphi', R', A^{(s')}, A^{(R's')}, A^{(s'R')})$ на систему $C = C(\varphi, R, A^{(s)}, A^{(RS)}, A^{(SR)})$ считается заданным, если задана пятерка отображений:

$$\begin{aligned} \alpha_1: \varphi' &\rightarrow \varphi; & \alpha_2: R' &\rightarrow R; \\ \alpha_3: A^{(s')} &\rightarrow A^{(s)}; & \alpha_4: A^{(R's')} &\rightarrow A^{(RS)}; \\ \alpha_5: A^{(s'R')} &\rightarrow A^{(SR)}. \end{aligned}$$

Описанный в [5] подход позволяет создать корректные математические модели конструкции, которые представляют собой набор связанных друг с другом элементов, входящих в библиотеки известных продуктов различных фирм (АСКОН, Autodesk, SolidWorks и др.).

Например, торсионный вал тягового привода электровоза (рис. 1) может быть представлен как система из подконструкций «Стержень», «Посадка с натягом» и «Переходная галтель», которые связаны с подконструкциями «Фланец упругой муфты» и «Фланец зубчатой муфты» и друг с другом.

Библиотечный элемент в виде массива данных может включать в себя элементы разного назначения (графический объект для системы создания конструкторской документации, элемент для моделирования физических процессов и т.п.). Для обеспечения совместимости разных систем при обращении к нему он может быть сконвертирован в файл требуемого формата. При

необходимости пользователями или администраторами системы могут быть созданы новые элементы.

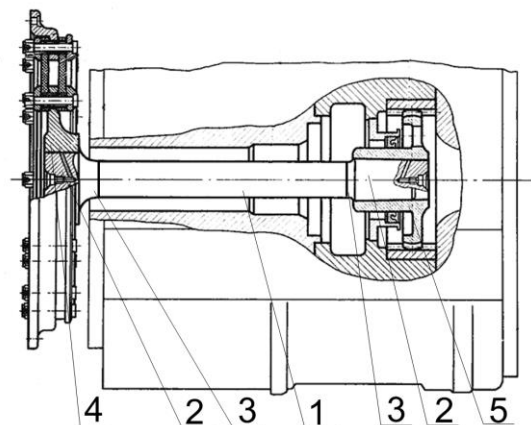


Рис. 1. Разбиение на подконструкции торсионного вала тягового привода электровоза: 1 – «Стержень»; 2 – «Посадка с натягом»; 3 – «Переходная галтель»; 4 – «Фланец упругой муфты»; 5 – «Фланец зубчатой муфты»

Метод моделирования, изложенный в [5], не имеет ограничений для формализации тягового привода как системы и позволяет автоматизировать процедуру отнесения детали или узла привода к тому или иному классу путем сравнения признаков. Основным недостатком этого метода является процедура создания новых решений, основанная на стихийно-эволюционном подходе: сначала выбирается прототип конструкции, а затем путем эмпирического анализа его эволюции создается усовершенствованная конструкция. Однако основной задачей при проектировании тяговых приводов в настоящее время является не столько усовершенствование ранее известных конструкций, сколько создание новых под существенно изменившиеся требования (непосредственный тяговый привод, привод для низкопольных экипажей и т.п.).

Для устранения данного недостатка воспользуемся положением о том, что основой построения объектной модели технической системы является классификация технических систем: «Наличие классификации технических систем позволяет идентифицировать вид структуры сложной технической системы, что позволяет провести декомпозицию системы в соответствии с типовой структурой» [6]. В насто-

ящее время авторами предложена классификация тяговых приводов локомотивов и другого рельсового подвижного состава, ориентированная на поиск новых решений [7], а в [8] предложен метод создания таких классификаций, основанный на общей алгоритмической модели процесса проектирования [9]. Отсюда следует, что объектная модель, то есть модель, которая описывает структуру объектов, составляющих систему, их атрибуты, операции, взаимосвязи с другими объектами и отражает прагматику разрабатываемой системы [10], должна отражать алгоритмическую модель процесса проектирования как базовую основу классификации (моделировать динамику создания тягового привода от наиболее общих схем до конкретного изделия). В то же время объектная модель должна соответствовать общей задаче – позволять максимально приблизить методологию проектирования привода к методам проектирования радиоэлектронной аппаратуры, где достигнута высокая сте-

пень автоматизации за счет применения стандартных элементов и комплектующих изделий.

Указанная цель достигается тем, что обобщенная объектная модель тягового привода локомотива состоит из двух частей: иерархии множеств описаний тягового привода при разной степени его схематизации, от набора базовых функций до описаний функциональных элементов – деталей и подконструкций, и библиотеки, содержащей описания типовых объектов – составных частей тягового привода, разделенных на функциональные элементы и описанных в виде иерархической структуры функционального взаимодействия между элементами (И-графа). При этом на уровне определения функциональных элементов привода производится поиск сходных объектов в библиотеке с помощью матриц мер сходства, а дальше процесс проектирования ведется путем видоизменения распознанных типовых узлов и деталей (рис. 2).

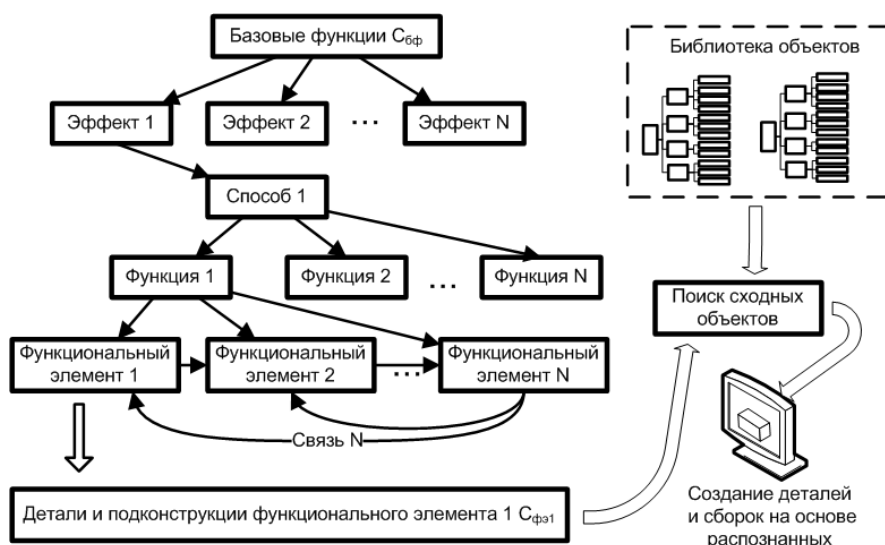


Рис. 2. Схема обобщенной объектной модели конструкции тягового привода

Для упрощения используем меру сходства в виде неотрицательной вещественной функции

$$C(R_i R_j) = \frac{2m(R_i \cap R_j)}{m(R_i) + m(R_j)}, \quad (2)$$

где $m(R_i \cap R_j)$ – число общих видов в описаниях R_i и R_j ; $m(R_i)$ и $m(R_j)$ – число видов в описаниях R_i и R_j .

Рассмотрим пример поиска прототипа в библиотеке объектов. Пусть R_1 – описание проектируемого торсионного вала, R_2 – R_7 – описания прототипов, S_1 – S_{12} – признаки объектов (табл. 1). На основании табл. 1 составляем видовые списки (табл.

2). Пусть множества $m(R_i)$, $m(R_j)$ - количество признаков i -го и j -го вариантов в видовых списках, множество $m(R_i \cap R_j)$ - количество признаков, одновременно имеющихся у i -го и j -го вариантов. Тогда мера включения множества признаков i -го варианта в j -й -

$$W(R_j; R_i) = \frac{m(R_i \cap R_j)}{m(R_i)}, \quad (3)$$

а мера включения множества призна-

ков j -го варианта в i -й -

$$W(R_i; R_j) = \frac{m(R_i \cap R_j)}{m(R_j)}, \quad (4)$$

На основании (3) и (4) вычисляем значения элементов матрицы мер включения (табл. 3) в процентах, округляя полученные значения до целых чисел.

Таблица 1

Библиотека объектов

При- знак	R ₁ Проект	R ₂ 2ТЭ121	R ₃ ЭП1	R ₄ ДС3	R ₅ ЧС1	R ₆ ЧС2К	R ₇ ЧС7(Е8)
S ₁	Стержень	Стержень	Стержень	Стержень	Стержень	Стержень	Стержень
S ₂	-	-	-	-	Конус	-	-
S ₃	Конич. посадка	Конич. посадка	Конич. посадка	-	-	-	-
S ₄	-	Цилинд. посадка	Цилинд. посадка	-	-	-	-
S ₅	-	-	-	-	Торцевые шлицы	-	-
S ₆	Радиальн. шлицы	-	-	Радиальн. шлицы	-	Радиальн. шлицы	Радиальн. шлицы
S ₇	-	-	-	-	-	Поводок	Поводок
S ₈	Галтель	Галтель	Галтель	Галтель	-	Галтель	Галтель
S ₉	-	-	-	-	Резьба внутр.	-	-
S ₁₀	Резьба наружная	-	-	Резьба наружная	-	Резьба наружная	Резьба наружная
S ₁₁	-	Канал	Канал	-	-	-	-
S ₁₂	Бурт	-	-	Бурт	-	Бурт	Бурт

Элемент матрицы мер пересечения (табл. 4) в i -й строке и j -м столбце есть $m(R_i \cap R_j)$, отсюда $m(R_i \cap R_i) = m(R_i)$. Элементы матрицы мер сходства (табл. 5) вычислены по формуле (2).

Например, для вариантов R_1 и R_2 число видов в описаниях признаков $m(R_1)=6$, $m(R_2)=5$, $m(R_1 \cap R_2) = 3$. Тогда

$$W(R_2; R_1) = \frac{m(R_1 \cap R_2)}{m(R_1)} = \frac{3}{6} = 50\%$$

(вторая строка - первый столбец табл. 3);

$$W(R_1; R_2) = \frac{m(R_1 \cap R_2)}{m(R_2)} = \frac{3}{5} = 60\%$$

(первая строка - второй столбец табл. 3). Соответственно в табл. 4 первая строка $m(R_1)=6$, вторая строка - первый столбец

$m(R_1 \cap R_2) = 3$, вторая строка второй столбец $m(R_2)=5$, а в табл. 5

$$C(R_1 R_2) = \frac{2m(R_1 \cap R_2)}{m(R_1) + m(R_2)} = \frac{2 \cdot 3}{6 + 5} = \frac{6}{11} = 55\%$$

(первая строка - первый столбец табл. 5). Как видно из матрицы мер сходства (табл. 5), наибольшее значение в столбце прототипа R_1 (91) оказывается для строки прототипа R_4 . Следовательно, близким к проектируемому объекту оказывается торсионный вал электроваза ДСЗ, который используется в качестве прототипа и изменяется в соответствии с заданными требованиями.

Далее в конструкции торсионного вала выделяется подконструкция, которая

отличает ее от прототипа детали (коническая посадка), и для нее производится поиск прототипа исходя из признаков, опи-

сывающих конструктивные особенности и предполагаемую технологию изготовления.

Таблица 2

Видовые списки

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
S ₁	1	1	1	1	1	1	1
S ₂	0	0	0	0	1	0	0
S ₃	1	1	1	0	0	0	0
S ₄	0	1	1	0	0	0	0
S ₅	0	0	0	0	1	0	0
S ₆	1	0	0	1	0	1	1
S ₇	0	0	0	0	0	1	1
S ₈	1	1	1	1	0	1	1
S ₉	0	0	0	0	1	0	0
S ₁₀	1	0	0	1	0	1	1
S ₁₁	0	1	1	0	0	0	0
S ₁₂	1	0	0	1	0	1	1

Таблица 3

Матрица мер включения

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇
R ₁		60	60	100	20	100	100
R ₂	50		100	40	25	33	33
R ₃	50	100		40	25	33	33
R ₄	83	40	40		25	83	83
R ₅	17	20	20	20		17	17
R ₆	83	40	40	100	25		100
R ₇	83	40	40	100	25	100	

Таблица 4

Матрица мер пересечения

R ₁	6						
R ₂	3	5					
R ₃	3	5	5				
R ₄	5	2	2	5			
R ₅	1	1	1	1	4		
R ₆	5	2	2	5	1	6	
R ₇	5	2	2	5	1	6	6
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇

Таблица 5

Матрица мер сходства

R ₂	55						
R ₃	55	100					
R ₄	91	40	40				
R ₅	20	22	22	22			
R ₆	83	37	36	91	20		
R ₇	83	37	36	91	20	100	
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₅	R ₆	R ₇	

Упрощенно говоря, предложенная объектная модель позволяет реализовать процесс автоматических подсказок типовых решений конструктору во время проектирования. Это отражает принцип конструирования, когда новая конструкция реализуется на базе максимально изученных и освоенных производством элементов и решает проблему поиска элементов в каталогах, характерную, например, для [12]. Экономический эффект от использования предложенной объектной модели заключается в снижении издержек от ошибок проектирования, выявляемых после изготовления опытных образцов.

Выводы:

1. Основным недостатком известных методов моделирования новых техниче-

ских решений механической части тягового привода локомотива является использование стихийно-эволюционного подхода.

2. Предложена объектная модель конструкции тягового привода в виде иерархии множеств описаний при разной степени его схематизации и библиотеки описаний типовых объектов в виде иерархической структуры функционального взаимодействия между элементами (И-графа), позволяющая реализовать автоматические подсказки как типовые конструкции из библиотеки описаний, найденные с помощью матриц мер сходства.

3. Предложенная модель конструкции позволяет сократить число ошибок проектирования за счет того, что новая конструкция реализуется с максимальным ис-

пользованием ранее изученных и техноло-

гически отработанных аналогов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов, Ю.Н. Повышение надежности узлов тягового привода пассажирских электровозов ЭП1М и ЭП10 / Ю.Н. Соколов, А.С. Пономарев, В.Е. Дегтярев // Локомотив-информ. – 2010. – № 6. – С. 4-11.
2. Вахромеева, Т.О. Снижение динамических нагрузок в тяговых приводах электровозов с рамным подвешиванием тяговых двигателей и карданными муфтами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.О. Вахромеева. – М., 2014. – 24 с.
3. Корнев, А.М. Модернизация системы подвешивания ТЭД электровоза постоянного тока 2ЭС6 / А.М. Корнев, Д.В. Липунов // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов. – Омск: ОмГУПС, 2016. – С. 237-242.
4. Аверченков, В.И. Основы математического моделирования технических систем: учеб. пособие / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. – Брянск: БГТУ, 2004. – 271 с.
5. Никитин, С.В. Моделирование новых технических решений локомотивов: учеб. пособие / С.В. Никитин. – Брянск: БИТМ, 1988. – 84 с.
6. Запорожцев, А.В. Моделирование технических систем / А.В. Запорожцев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8-6. – С. 1288-1294.
7. Измеров, О.В. Классификация как инструмент синтеза механической части тяговых приводов

- железнодорожного подвижного состава / О.В. Измеров, Г.С. Михальченко // Мир транспорта и технологических машин. – Орел: ГУ-УНПК, 2012. – № 4 (39). – С. 53-60.
8. Воробьев, В.И. Общие принципы классификации механической части тяговых приводов локомотивов / В.И. Воробьев, О.В. Измеров, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Совершенствование энергетических машин: сб. науч. тр. / под ред. В.В. Роголѣва. – Брянск: БГТУ, 2015. – С. 241-248.
9. Измеров, О.В. Кибернетические аспекты методов синтеза электромеханических систем: монография / О.В. Измеров [и др.]; под ред. А.С. Космодамианского. – Орел: ГУ-УНПК, 2015. – 234 с.
10. Буч, Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений: [пер. с англ.] / Гради Буч, Роберт А. Максимчук, Майкл У. Энгл, Бобби Дж. Янг, Джим Коналлен, Келли А. Хьюстон. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2008. – 720 с.
11. Koller, R. Konstruktionsmethode fur den Maschinen-, Gerate- und Apparatebau / R. Koller. – Springer, 1976. – 191 p.
12. Roth, K. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1. Konstruktionslehre / K. Roth. – Berlin: Springer, 2000. – 440 p.

1. Sokolov, YU.N. Povyshenie nadezhnosti uzlov tyagovogo privoda passazhirskih ehlektrovozov EHP1M i EHP10 / YU.N. Sokolov, A.S. Ponomarev, V.E. Degtyarev // Lokomotiv-inform. – 2010. – № 6. – S. 4-11.
2. Vahromeeva, T.O. Snizhenie dinamicheskikh nagruzok v tyagovykh privodakh ehlektrovozov s ramnym podveshivaniem tyagovykh dvigatelej i kardannymi muftami: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk/ T.O. Vahromeeva. M., 2014. – 24 s.
3. Kornev, A.M. Modernizatsiya sistemy podveshivaniya TEHD ehlektrovoza postoyannogo toka 2EHS6 / A.M. Kornev, D.V. Lipunov // EHkspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie ehffektivnosti tyagi poezdov. OM-GUPS, Omsk: 2016. – С. 237-242.
4. Averchenkov, V.I. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie / V.I. Averchenkov, V.P. Fedorov, M.L. Hejfec. Bryansk: BGTU, 2004. – 271s.
5. Nikitin, S.V. Modelirovanie novykh tekhnicheskikh reshenij lokomotivov: ucheb. posobie / S.V. Nikitin. Bryansk: BITM, 1988. – 84 s.
6. Zaporozhcev, A.V. Modelirovanie tekhnicheskikh sistem /A.V. Zaporozhcev // Fundamental'nye issledovaniya. – 2014. – № 8-6. – S. 1288-1294.
7. Izmerov, O.V. Klassifikatsiya kak instrument sinteza mekhanicheskoy chasti tyagovykh privodov zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava/ O.V. Iz-

- merov, G.S. Mihal'chenko // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. – Орел: GU-UNPK, 2012. – №4 (39). – S. 53-60.
8. Vorob'ev, V.I. Obshchie principy klassifikatsii mekhanicheskoy chasti tyagovykh privodov lokomotivov / V.I. Vorob'ev, O.V. Izmerov, A.A. Puga-chev, D.A. Bondarenko // Sovershenstvovanie ehnergeticheskikh mashin: sb. nauch. tr. / pod red. V.V. Rogalyova. – Bryansk: BGTU, 2015. – S. 241-248.
9. Izmerov, O.V. Kiberneticheskie aspekty metodov sinteza ehlektromekhanicheskikh sistem: monografiya / O.V. Izmerov [i dr.]; pod red. A.S. Kosmodamianskogo. – Орел: Gosuniversitet - UNPK, 2015. – 234 s.
10. Buch, G. Ob"ektno-orientirovan-nyj analiz i proektirovanie s primerami prilozhenij [per. s angl.] / Gradi Buch, Robert A. Maksimchuk, Majkl U. EHngl, Bobbi Dzh. YAng, Dzhim Konallen, Kelli A. H'yuston. – 3-e izd. M.: Vil'yams, 2008. – 720 s.
11. Koller, R. Konstruktionsmethode fur den Maschinen-, Gerate- und Apparatebau: / R. Koller. Springer, 1976. – 191p.
12. Roth, K. Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1 Konstruktionslehre / K. Roth. Berlin, Springer: 2000. – 440p.

Статья поступила в редколлегию 15.06.17.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного
технического университета
Горленко О.А.

Сведения об авторах:

Воробьев Владимир Иванович, к.т.н., доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.

Измеров Олег Васильевич, соискатель кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского

Vorobiev Vladimir Ivanovich, Bryansk State Technical University Ph. D., associate Professor of the Department “Railroad rolling stock” e-mail: vladimvorobiev@yandex.ru.

Izmerov Oleg Vasilevich, Bryansk State Technical University Competitor of the Department “Railroad rolling stock”, 56-14-44.

государственного технического университета, тел.: 56-14-44.

Маслов Максим Александрович, аспирант кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета, e-mail: maslovmaksim32@mail.ru.

Maslov Maksim Aleksandrovich, Bryansk State Technical University Graduate student of the Department “Railroad rolling stock”, maslovmaksim32@mail.ru.

УДК 621.83.06

DOI: 10.12737/article_59cd74e6933476.44748514

Д.М. Макаревич, С.Д. Макаревич

ДВИГАТЕЛЬНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПРИВОД

Рассмотрены вопросы создания моторного привода для разъединителей контактной сети электрифицированных участков железной дороги на основе асинхронного двигателя и нелинейной механической передачи, а также вопросы синтеза

криволинейного кулисного механизма для данного привода.

Ключевые слова: привод, кулиса, разъединители, асинхронный двигатель, редукторы, кривошип.

D.M. Makarevich, S.D. Makarevich

MOTOR ASYNCHRONOUS RAILWAY DRIVE

The work purpose consists in the development and creation of a new design of the motor drive for circuit breakers of a contact system of electrified railway track sections, the analysis of the curvilinear rocker mechanism synthesis for this drive.

A possibility of the curve synthesis for creation of a link ensuring a specified law of motion at the known geometrical parameters of a unit and also specified power and kinematic parameters of input and output units is analyzed.

The investigation results allowed developing, designing, manufacturing and testing a motor drive for

switching contact breakers of electrified railway sections.

The results of this work allowed creating a motor drive with a rocker mechanism consisting of two arched guides which has a possibility to increase considerably a rotational moment imparting to a working element at the moment of the breaker switching on or out.

Key words: drive, link, circuit breakers, asynchronous motor, reducer, crankshaft.

Введение

Для предприятий железной дороги в Республике Беларусь и Российской Федерации актуальна проблема создания надежных и недорогих двигательных приводов для переключения контактных разъединителей на ее электрифицированных участках. Применяемые в настоящее время приводы (УМП-2) разработаны и изготовлены более тридцати лет назад и не соответствуют тем тенденциям, которые наметились в последнее время при создании такого рода устройств: упрощение кон-

струкции, снижение габаритов, материалоёмкости, а также уменьшение энергопотребления. Кроме этого, организации, эксплуатирующие двигательные приводы для переключения контактных разъединителей, выдвинули требования по улучшению их работы: увеличение крутящего момента в начале поворота выходного вала привода (до 300 Нм) и отказ от использования в конструкции привода коллекторного двигателя.

Постановка задачи

Одним из требований, предъявляемых к приводу для переключения контактных разъединителей, был отказ от применения в его конструкции коллекторного двигателя. Поэтому было принято решение использовать в конструкции более надежный и дешевый асинхронный двигатель, а его недостатки (небольшой крутящий мо-

мент [1]) компенсировать при помощи редуцирующего механизма. Таким образом, редуцирующий узел привода для переключения контактных разъединителей должен обеспечить необходимый крутящий момент на выходном валу привода, а также разгон асинхронного двигателя.

Метод решения задачи и анализ полученных результатов

Для решения поставленной задачи были исследованы различные варианты конструкций двигательных приводов для переключения контактных разъединителей (УМП-2, ПДВ-20 и др.).

По результатам исследования [2] в качестве прототипа для нового привода решено было выбрать конструкцию привода ПДВ-20, усовершенствовав его редуцирующую часть. Для этого необходимо было решить две задачи: повысить КПД первой ступени редуктора, а форму кулисы сконструировать таким образом, чтобы она позволяла разогнаться асинхронному дви-

гательно до номинальных оборотов без значительной нагрузки, а также увеличить крутящий момент на выходном валу привода.

Проанализируем возможность синтеза кривой для создания кулисы, обеспечивающей заданный закон движения при известных геометрических параметрах механизма, а также заданных силовых и кинематических параметрах входного и выходного звеньев. Рассмотрим общий случай взаимодействия двух звеньев: кривошипа и кулисы (рис. 1).

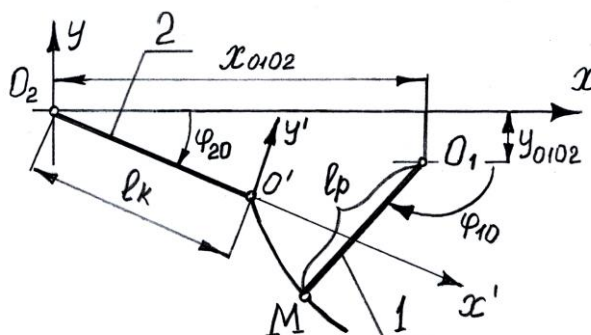


Рис. 1. К кинематическому анализу кулисного механизма

Заданными параметрами считаем длину кривошипа l_p , расстояния вдоль оси абсцисс x_{O1O2} и y_{O1O2} - между центрами вращения кривошипа O_1 и кулисы O_2 . Введение этого участка в конструкцию носит условный характер, так как призвано обозначить начало отсчета криволинейного участка относительно точки вращения O_2 . Также известной является длина прямолинейного участка кулисы l_k . В качестве положительного направления вращения кривошипа и кулисы примем вращение против хода часовой стрелки. Начальный угол кривошипа - φ_{10} , начальный угол кулисы - φ_{20} .

Абсолютную (неподвижную) систему координат свяжем с центром вращения кулисы O_2 , а с точкой O' свяжем подвижную систему отсчета, вращающуюся вместе с прямолинейным участком кулисы l_k . Криволинейный участок в данной системе описан уравнением $y' = f(x')$.

Эту зависимость можно заменить системой параметрических уравнений:

$$x' = f(t);$$

$$y' = f(t),$$

где t – параметр (время). В качестве параметра может также выступать угол поворота кривошипа φ_1 .

Задачей проводимого анализа является получение такой зависимости $y' = f(x')$, которая удовлетворяла бы заданным кинематическим и силовым зависимостям, описывающим условия функционирования механизма.

Положение точки M (пальца кривошипа, движущегося по направляющей кулисы) при рассмотрении кинематической цепи со стороны кривошипа описывается в неподвижной системе уравнениями

$$x_M = x_{O1O2} - l_p \cos(\pi - \varphi_{10} - \varphi_1); \quad (1)$$

$$y_M = y_{O1O2} - l_p \sin(\pi - \varphi_{10} - \varphi_1), \quad (2)$$

а при рассмотрении кинематической цепи

$$x_M = l_k \cos(\varphi_{20} + \varphi_2) + O_3M \cos(\varphi_3 + \varphi_{20} + \varphi_2); \quad (3)$$

$$y_M = -l_k \sin(\varphi_{20} + \varphi_2) - O_3M \sin(\varphi_3 + \varphi_{20} + \varphi_2), \quad (4)$$

где φ_1 - угол поворота кривошипа; φ_2 - угол поворота кулисы.

Согласно условию задачи, известной считаем функцию изменения угла φ_1 от времени. При равномерном вращении кривошипа известной является его угловая скорость ω_1 , при этом $\varphi_1 = \omega_1 t$. Также известным (заданным) считаем закон изменения угла поворота $\varphi_2 = f(\varphi_1)$. Например, рассмотрим закон изменения угла поворо-

со стороны кулисы -

та кулисы, представленный в следующем виде:

$$\varphi_2 = \sin\left(\frac{\pi\varphi_1}{2}\right).$$

Исследования проводились при изменении угла поворота φ_1 от 0 до $\pi/2$. Приравняем уравнения (1) и (3), а также (2) и (4). Получим систему уравнений с двумя неизвестными - расстоянием $O'M$ и углом φ_3 :

$$x_{O_1O_2} - l_p \cos(\pi - \varphi_{10} - \varphi_1) - l_k \cos(\varphi_{20} + \varphi_2) - O'M \cos(\varphi_3 + \varphi_{20} + \varphi_2) = 0;$$

$$y_{O_1O_2} - l_p \sin(\pi - \varphi_{10} - \varphi_1) + l_k \sin(\varphi_{20} + \varphi_2) + O'M \sin(\varphi_3 + \varphi_{20} + \varphi_2) = 0.$$

Решение данной системы возможно только в численном виде. В данном случае использовался программный пакет Maple. Угол φ_1 изменялся от 0 до $\pi/2$. На каждом шаге вычислений определялись параметры $O'M$ и φ_3 . Координаты кривой x' и y' определяются по формулам

$$x' = O'M \cos(\varphi_3);$$

$$y' = O'M \sin(\varphi_3).$$

Результаты расчета представлены на рис. 2. Рассматривалась система со следующими параметрами: $l_p = 0,2$ м, $l_k = 0,2$ м, $x_{O_1O_2} = 0,4$ м, $y_{O_1O_2} = -0,1$ м, $\varphi_{10} = 0,5\pi$, $\varphi_{20} = 0,25\pi$.

Разработанный алгоритм позволяет проектировать форму кулисы, позволяющую обеспечивать заданный закон ее движения.

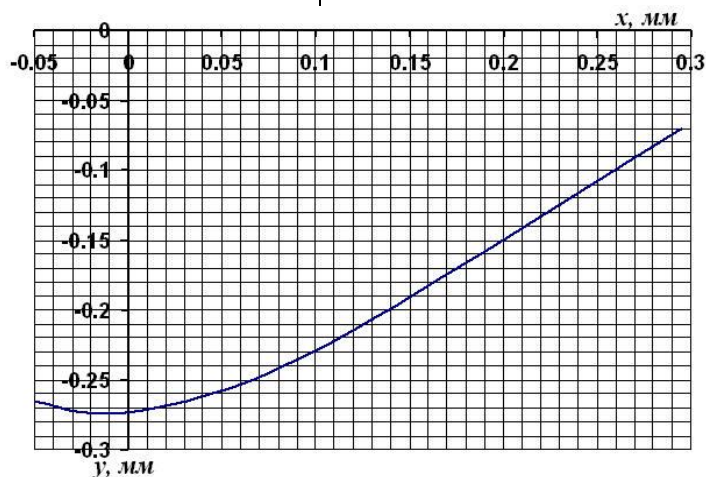


Рис. 2. Синтезированная криволинейная форма кулисы

С учетом сложности изготовления кулисы синтезированной криволинейной формы было предложено использовать дугу окружности постоянного радиуса.

Рассмотрим упрощенную схему кулисного механизма, изображенную на рис. 3. Детали механизма заменены геометрическими примитивами.

определить функцию положения ($\varphi_2 = f(\varphi_1)$) в произвольный момент времени. Это позволяет определить передаточное число кулисного механизма, которое не постоянно за цикл работы механизма. Данные уравнения были исследованы с помощью программного пакета Mathcad. Зависимость изменения угла φ_2 от изменения угла φ_1 графически представлена как функция $\varphi_2(\varphi_1)$ на рис. 4. Также на рис. 4 представлено изменение производной угла поворота φ_2 от угла $\varphi_1 - \frac{d}{d\varphi_1} \varphi_2(\varphi_1)$. Это выражение является аналогом угловой скорости кулисы и характеризует скорость поворота этого звена.

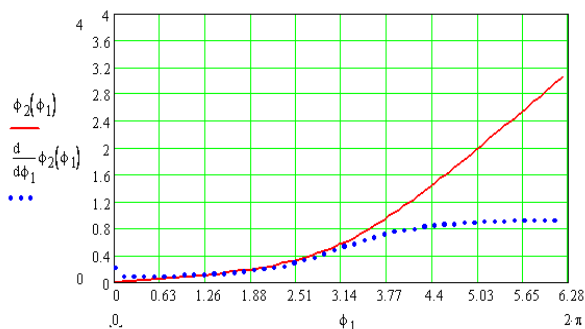


Рис. 4. Зависимость угла поворота кулисы и его производной от угла поворота кривошипа

Если рассматривать постоянный режим работы, т.е. угловую скорость кривошипа считать постоянной ($\omega_2 = \text{const}$), то мгновенное передаточное отношение механизма, определяемое как отношение угловой скорости ω_1 входного звена (кривошипа) к угловой скорости ω_2 выходного звена (кулисы), можно заменить отношением углов $\frac{\varphi_1}{\varphi_2}$.

Передаточное отношение определяли по формуле

$$i(\varphi_1) = \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \quad (6)$$

График зависимости (6) приведен на рис. 5. При построении графиков на рис. 4 и 5 использовались следующие числовые значения длины кривошипа и

радиуса кривизны кулисы соответственно: $r_k = 57$ мм, $R = 68$ мм. Данные значения выбраны конструктивно, исходя из минимальных габаритов кулисного механизма.

Как следует из анализа графиков, представленных на рис. 4 и 5, криволинейная форма кулисы дает возможность электродвигателю в начальный момент разогнаться до номинальных оборотов с малой нагрузкой.

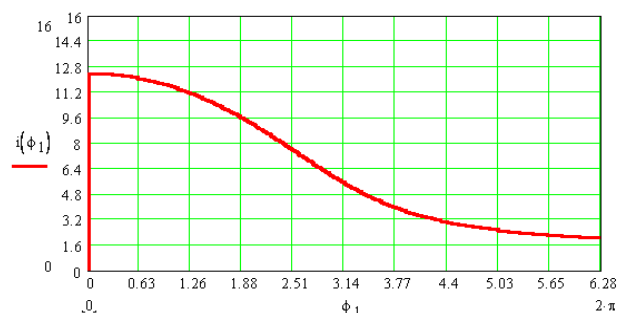


Рис. 5. Зависимость мгновенного передаточного числа от угла поворота кривошипа

На рис. 4 видно, что скорость (аналог скорости) будет постепенно увеличиваться от минимального значения, которое и требуется в начальный момент. Из графика на рис. 5 видно, что мгновенное передаточное отношение в начальный момент больше десяти. Это означает, что на валу двигателя в этот момент будет незначительная нагрузка.

Когда разъединение токоразъединителей и клемм произошло, значительных крутящих моментов не требуется (на рис. 5 мгновенный КПД уменьшается), а скорость увеличивается, что необходимо для скорейшего прерывания электрической дуги, возникающей сразу после разрыва контакта и препятствующей продолжению движения токоразъединителей. Данное решение и позволило вместо коллекторного двигателя применить более дешевый и надежный двигатель.

В предлагаемом приводе используется асинхронный двигатель с частотой вращения 1500 об/мин. Редуктор первой ступени имеет передаточное число 63, передаточное число кулисного механизма в начальный момент времени - около 12,

значит, общее передаточное число привода - около 754, что значительно повышает значение крутящего момента, передаваемого от двигателя.

С помощью программ автоматизированного проектирования была определена рациональная геометрия кулисного механизма, при которой обеспечивалось бы минимальное значение крутящего момента на валу электродвигателя и постепенное увеличение скорости его вращения (разгон) для возможности передачи максимальной нагрузки на ножи токоразъединителей.

Для моделирования и оптимизации использовалась программа MSC.Adams (версия 2003 г.), которая позволяет автоматизировать динамический анализ механических систем [3]. С помощью этой программы нами был осуществлен процесс оптимизации геометрических параметров кулисного механизма.

Испытания редукторов первой ступени с повышенным КПД проводились на специальном стенде, разработанном в лаборатории кафедры «Теоретическая механика» Белорусско-Российского университета. Все редукторы испытывались в одинаковых условиях: мощность двигателя составляла 0,55 кВт, передаточное число всех испытываемых редукторов - 63.

Практическое приложение результатов

По результатам исследований был разработан, спроектирован, изготовлен и испытан двигательный привод для переключения контактных разъединителей [4].

Привод состоит из планетарного мотор-редуктора, на выходном валу которого размещена шариковая муфта, предназначенная для ручного управления приводом, а также для предохранения привода от перегрузок. Муфта посредством зубчатой

Заключение

Результаты испытаний показали, что благодаря использованию в двигательном приводе кулисного механизма, состоящего из двух направляющих дугообразной фор-

Испытаниям были подвергнуты следующие малогабаритные редукторы, разработанные в Белорусско-Российском университете:

1. Планетарный эксцентриковый редуктор, разработанный на кафедре «Технология

машиностроения» Белорусско-Российского университета. Максимальный передаваемый данным редуктором момент составил 9 кгм (88,2 Нм).

2. Цепной редуктор, разработанный на кафедре «Основы проектирования машин». Максимальный передаваемый момент составил 10 кгм (98 Нм).

3. Планетарный эксцентриковый редуктор, разработанный на кафедре «Теоретическая механика». Максимальный передаваемый момент составил 18 кгм (176,4 Нм).

4. Планетарный прецессионный редуктор, разработанный на кафедре «Теоретическая механика». Максимальный передаваемый момент составил 21 кгм (205,8 Нм).

По результатам исследований в качестве редуцирующего механизма первой ступени был выбран планетарный прецессионный редуктор.

передачи соединена с кривошипом, который, в свою очередь, передает момент криволинейной кулисе, расположенной на выходном валу. Механизм привода размещен в герметичном стальном корпусе. Привод работает в автоматическом и ручном режимах и взаимодействует с существующей на предприятиях железной дороги системой телеуправления и телесигнализации.

мы, имеется возможность значительно увеличить крутящий момент, передаваемый на рабочий орган в момент включения или отключения разъединителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хализев, Г.П. Электрический привод / Г.П. Гализев. - М.: Высш.шк., 1977. - 256 с.
2. Никитин, А.П. Исследование малогабаритных энергосберегающих приводов / А.П. Никитин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. (г. Могилев, 23-24 янв. 2006 г.). - Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2006. - С. 61.
3. Макаревич, Д.М. Определение геометрических параметров кулисного механизма с использованием MSCADAMS / Д.М. Макаревич, А.П. Никитин, М.Е. Лустенков // Материалы,

оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. (г. Могилев, 19-20 апр. 2007 г.). - Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2007. - Ч. 1. - С. 135.

4. Двигательный привод токоразъединителя: пат. РФ на изобрет. RU2337261 / А.П. Никитин, Д.М. Макаревич, М.П. Слука, М.Е. Лустенков, П.Ф. Никитин // Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. - Оpubл. 27.10.08, Бюл. № 25.

1. Khalizev, G.P. *Electric Actuator* / G.P. Galizev. - M.: Higher School, 1977. - pp. 256.
2. Nikitin, A.P. Investigation of small energy-saving drives / A.P. Nikitin // New materials, equipment and technologies in industry: *Proceedings of the Rep. Scientific Tech. Conf.* (Mogilev, January 23-24, 2006) - Mogilev: Belorussian-Russian University, 2006. - pp. 61.
3. Makarevich, D.M. Geometrical parameters definition of rocker mechanism using MSCADAMS / D.M. Makarevich, A.P. Nikitin, M.E. Lustenkov //

Material, Equipment and Resource-saving technologies: *Proceedings of the Inter. Scientific Tech. Conf.* (Mogilev, April 19-20, 2007). - Mogilev: Belorussian-Russian University, 2007. - Part 1. - pp. 135.

4. Motor drive of current breaker: Pat. For Invention RF RU2337261 / A.P. Nikitin, D.M. Makarevich, M.P. Sluka, M.E. Lustenkov, P.F. Nikitin // *Official Bulletin of the Russian Agency for Patents and Trade Marks. Inventions. Utility Models.* - published 27.10.08, Bull. No. 25.

Статья поступила в редколлегию 15.09.17.

Рецензент: д.т.н., профессор
Пашкевич В.М.

Сведения об авторах:

Макаревич Дмитрий Михайлович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Сопротивление материалов» Белорусско-Российского университета, тел.: +375 29 1989750.

Макаревич Сергей Дмитриевич, к.т.н., доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Белорусско-Российского университета, e-mail: makarevich-s@mail.ru.

Makarevich Dmitry Mikhailovich, Can. Eng. Assistant Prof., Head of the Dep. "Material Resistance", Belorussian-Russian University, Phone: +375 29 1989750.

Makarevich Sergey Dmitrievich, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Life Safety", Belorussian-Russian University, e-mail: makarevich-s@mail.ru.

ПРАВИЛА
направления, рецензирования и опубликования научных статей
в журнал «Вестник Брянского государственного технического университета»

1. К публикации принимаются научные и научно-технические статьи, отражающие результаты исследований, проведенных автором (авторами), научные обзоры, итоговые материалы научных мероприятий (симпозиумов, конференций, семинаров и т.д.), которые должны соответствовать тематике журнала.

2. Авторы должны предоставлять оригинальные работы, содержащие достоверные результаты проделанной научной работы. При использовании текстовой или графической информации, заимствованной из работ других лиц, необходимы ссылки на соответствующие публикации. Если элементы рукописи ранее уже были опубликованы, то авторам необходимо сослаться на более раннюю работу, указав отличие новой работы от предыдущей.

3. Подача статьи в более чем один журнал является неприемлемой и расценивается как незтичное поведение авторов.

4. Для публикации статьи в журнале в редакцию представляются в электронном виде:

- текст статьи с подписями всех авторов (файл с расширением .pdf);
- текст статьи (файл с разрешением .doc; Word-2003);
- рецензия-рекомендация доктора наук с подписью рецензента и печатью организации, в которой он работает (файл с расширением .pdf);
- экспертное заключение о возможности опубликования материалов статьи в открытой печати (файл с расширением .pdf);
- письменная рекомендация научного руководителя (для аспирантов, магистрантов и студентов) (файл с расширением .pdf);
- пакет рисунков и иллюстраций (файлы tiff, jpg с расширением растровых иллюстраций не ниже 300 dpi).

Текст статьи должен быть вычитан автором.

5. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. В качестве рецензентов могут быть привлечены члены редакционного совета журнала, обладающие профессиональными знаниями и опытом работы по научному направлению, близкому к теме рукописи авторов. Рекомендации рецензентов являются основанием для принятия решения о публикации статьи. Специалисты, работающие в той же организации, в которой работает и автор (авторы) статьи, не могут выступать в качестве рецензентов. Срок рецензирования - не более 10 дней со дня поступления статьи в редакцию журнала. При наличии рекомендации статьи к доработке или отказе в публикации автору высылается копия рецензии. Рецензии на статьи хранятся в редакции не более 3 лет.

6. Файлы, представляемые в редакцию, должны быть названы по фамилии первого автора (например: Ivanov_I.I.).

7. Объём статьи - 5-10 страниц формата А4 (режим автоматической расстановки переносов), включая графики, рисунки, таблицы и список литературы.

8. Текст статьи печатается через 1 интервал и должен содержать:

- в левом верхнем углу - УДК (высота букв - 12 пт.);
- справа – инициалы, фамилию автора (авторов) через запятую (высота букв - 12 пт.);
- название статьи (высота прописных букв - 14 пт., шрифт жирный, выравнивание по центру);
- аннотацию (4 – 6 строк; высота букв - 10 пт.; абзац - 7 мм; распределение текста по двум колонкам);
- ключевые слова (6 – 8 слов; высота букв - 10 пт.; абзац - 7 мм; распределение текста по двум колонкам);
- текст статьи (высота букв - 12 пт.; абзац – 10 мм; поля: слева, справа, сверху и снизу – 20 мм);
- список литературы (высота букв - 10 пт., заголовок – прописными буквами);

– сведения об авторах: Ф.И.О. (полностью), ученую степень, ученое звание, должность, место работы, рабочий и домашний телефоны, e-mail (высота букв - 10 пт., заголовок – прописными буквами, выравнивание по правому краю);

– реферат (высота букв - 10 пт.; абзац - 7 мм; распределение текста по двум колонкам).

Ссылку на гранты размещают в конце текста статьи (после раздела «Заключение»).

9. Заглавие статьи должно быть информативным, четко отражать ее содержание в нескольких словах (преимущественно ключевых). Аннотация дает возможность установить основное содержание статьи, определить его релевантность и следует ли читателю обратиться к полному тексту статьи (одним из вариантов построения аннотации является краткое повторение структуры статьи, включающей цели, задачи, методы и результаты). Реферат переводится в редакции журнала на английский язык и имеет целью информировать зарубежного читателя о содержании статьи. Он должен быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не дублировать полученные и опубликованные ранее результаты), содержательным (отражать цель, методы, ход проведенного исследования, результаты, краткие выводы работы), структурированным (следовать логике описания результатов статьи) и компактным (15 – 20 строк).

10. Текст статьи должен быть структурирован. Введение содержит реферативное изложение постановки задачи и возможного применения результатов на практике. Основная часть должна иметь несколько внутренних разделов (с подзаголовками) и содержать формализованную постановку задачи и предлагаемый метод ее решения; отличие предлагаемой постановки задачи от уже известных; преимущество развиваемого метода по сравнению с существующими (содержать пример, подтверждающий работоспособность и эффективность предлагаемого решения). Завершить статью должно содержательное обсуждение (заключение) полученных результатов.

11. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского и греческого алфавитов), цифры, знаки должны быть четкими, различимыми. Все латинские буквы набираются курсивом, все русские и греческие – прямо. Формулы должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0 (версия Word-2003) размером 12 пт.

12. Рисунки, графики, диаграммы, схемы, таблицы и др. графические материалы размещаются внутри текста (после их упоминания) и должны иметь подрисуночные подписи (высота букв - 10 пт., выравнивание по центру), а таблицы – заголовок. Формат обтекания рисунков - «вокруг рамки». На рисунках надписи пишутся прямо, с заглавной буквы, шрифт - Times, высота букв – 10 пт. Формулы должны быть набраны в редакторе, совместимом с MS Word 2010.

13. Список литературы оформляется по ГОСТ 7.1 – 2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание», не должен превышать 10 наименований изданий, напечатанных не ранее 1970 г.

14. Единицы измерения всех физических величин приводятся в СИ.

15. Редакционная коллегия проводит экспертизу комплектности представленных документов (в соответствии с п. 4), анализирует текст статьи на наличие заимствований с использованием системы «Антиплагиат» и рецензирует статьи, используя критерии актуальности, научной новизны, информативности, соответствия основным научно-техническим направлениям журнала.

16. Если статья по рекомендации редакционного совета возвращается на доработку (до 7 рабочих дней), то в журнале указывается дата поступления исправленного текста.

17. Авторам статей гонорар не выплачивается.

18. Статьи, не соответствующие тематике научно-технического журнала и не отвечающие настоящим требованиям, а также представленные с нарушением комплектности, к рассмотрению не принимаются. Рукописи авторам не возвращаются. Редакция не несёт обязательств по рецензированию всех поступающих материалов и не вступает в дискуссию с авторами отклоненных рукописей.



Лаборатория волнового деформационного и комбинированного упрочнения в аддитивных и субтрактивных технологиях

Задачей лаборатории, созданной в 2016 году на базе Брянского государственного технического университета при финансовой поддержке Фонда перспективных исследований, является разработка новой технологии упрочнения металлов и сплавов с использованием волны деформации.

В основе технологии - удар, но не простой, а через промежуточное звено – волновод. При одной и той же энергии удара достигаются разные результаты. Благодаря волноводу формируется волна деформации. Волна деформации - поток импульсов, отличающихся наличием не только головной, но и хвостовой части, которая формируется за счет отражения и наложения упругих волн в бойке, волноводе, упрочняемом изделии. Это позволяет в 10 раз увеличить длительность импульса, в несколько раз увеличить коэффициент полезного действия удара. В результате наложения проходящих и отраженных волн при определенных условиях в монолитном металлическом материале формируется уникальная многослойная гетерогенная, естественно армированная структура, обеспечивающая высокую вязкость и высокую прочность материала одновременно, что способствует многократному повышению эксплуатационных свойств.

Предлагаемая технология волнового деформационного упрочнения может применяться как самостоятельно, так и в составе комбинированных упрочняющих технологий, например, совместно с химико-термической и термической обработкой, как в субтрактивных, так и в аддитивных технологиях.

Субтрактивными называют традиционные технологии, которые связаны с вырезанием изделия из глыбы материала, при этом большая часть материала превращается в стружку. Аддитивные технологии – интенсивно развивающиеся сегодня технологии будущего, связаны с выращиванием готового изделия послойным сплавлением из порошка или из проволоки. Обработка тоже может иметь место, однако, количество стружки в этом случае минимально.

В настоящее время важнейшей задачей аддитивных технологий является обеспечение не только высокой точности изделия, но и качественной структуры материала и высоких эксплуатационных свойств получаемой детали при многократном увеличении производительности. С увеличением производительности резко увеличивается количество дефектов структуры, растет пористость, снижается надежность и ресурс изделия. Предлагается в процессе аддитивного выращивания изделия подвергать материал послойному волновому деформационному упрочнению с целью структурирования, уплотнения, что позволит быстро получать изделия с высокими эксплуатационными свойствами.

Успешное решение поставленной задачи позволит увеличить полезную нагрузку на материал, что таит огромные резервы повышения тактико-технических характеристик изделий в авиации, космонавтике, автомобилестроении, общем машиностроении, инструментальном производстве, энергетической, нефтегазовой и строительной отраслях.

Исследования проводятся в интересах АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод», Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва, Государственного космического научно-производственного центра имени М.В. Хруничева, АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз–Антей», ПАО «Объединённая авиастроительная корпорация».

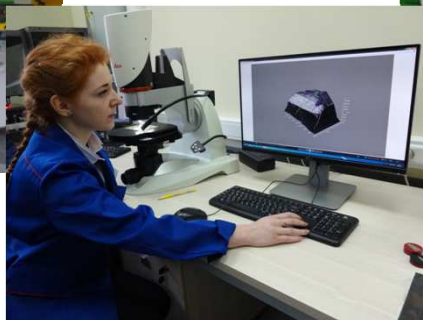


Для достижения поставленных целей выстраиваются партнерские отношения с ведущими научно-исследовательскими центрами страны, такими, как Центральный научно-исследовательский институт материалов (г. Санкт-Петербург), Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (г. Москва), Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (г. Черноголовка), АО Центральный научно-исследовательский институт точного машиностроения (г. Климовск), АО "Центральный научно-исследовательский институт "БУРЕВЕСТНИК" (г. Нижний Новгород).

Практическая востребованность результатов и глубина научной проработки проекта явились основанием для принятия решения Фондом перспективных исследований (ФПИ) и Министерством образования и науки РФ о финансировании исследований лаборатории на три года в объеме более 200 миллионов рублей.

Целью деятельности ФПИ является поддержка научных исследований в интересах обороны страны и безопасности государства, создания качественно производства высокотехнологичной продукции военного, специального и двойного назначения. Все поддержанные ФПИ проекты проходят тщательную комплексную трехуровневую экспертизу.

За всю историю ФПИ поддержано всего 52 проекта, следовательно, далеко не в каждом регионе есть лаборатория фонда. Открытая при Брянском государственном техническом университете лаборатория – единственная не только в Брянской области, но и в прилегающих регионах.



Тел. (4832) 51-51-38, моб. +7-919-214-04-24

(контактное лицо – д-р техн. наук, проф. Киричек Андрей Викторович)

E-mail: avk@tu-bryansk.ru

Автоматизированная система рейтинговой оценки результативности профессиональной деятельности научно-педагогических работников университета



Система предназначена для применения на всех уровнях образовательного учреждения (ректорат, деканаты, кафедры) и его подсистем (профессиональный колледж, филиал) для решения задач управления, повышения активности сотрудников и улучшения качества их работы. Система позволяет собирать сведения о работе научных, научно-педагогических и педагогических работников и структурных подразделений более чем по 150 показателям их работы.

Система автоматизирует подготовку годового отчёта образовательного учреждения по НИР в соответствии с требованиями Министерства образования и науки, а также годовых и текущих отчетов по различным показателям деятельности вуза, его структурных подразделений и сотрудников.

Система предоставляет оценочную (рейтинговую) информацию и модули для построения системы материального и морального стимулирования преподавателей в соответствии с их рейтингом, а также составляет инструментальную основу формирования стимулирующей составляющей заработной платы сотрудников коллектива.

Применение системы способствует созданию соревновательной среды в образовательном учреждении. Практическая ценность системы обусловлена также переходом к системе оплаты труда, учитывающей показатели потенциала и активности сотрудников; система является инструментом перехода к заключению эффективных контрактов.

Система поставляется в одной из трёх возможных конфигураций: для учреждения системы высшего профессионального образования, системы среднего профессионального образования или интегрированной системы многоуровневого (ВПО и СПО) профессионального образования.

При приобретении вузом или профессиональным колледжем Автоматизированной системы рейтинговой оценки результативности профессиональной деятельности научно-педагогических работников коллектив разработчиков может ее адаптировать по требованию заказчика к условиям конкретного образовательного учреждения.

Тел. (4832) 51-51-38, моб. +7-919-202-70-07

(контактное лицо – канд. соц. наук Морозова Анна Валентиновна)

Е-mail: niotiostu@gmail.com



В Е С Т Н И К БРЯНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Литературный редактор М.Л. Щербакова
Корректоры В.А. Ерохина, М.Л. Щербакова
Компьютерная верстка В.А. Ерохина

Подписано в печать 25.09.17. Дата выхода в свет 28.09.17. Формат 60x84¹/₈.
Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 10,23.
Тираж 500 экз. Свободная цена. Заказ 95

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».
241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, БГТУ., тел. (4832) 58-82-77.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии БГТУ,
241035, Брянск, ул. Институтская, 16