МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Серія: Технології в машинобудуванні

№ 26 (1248) 2017

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2017

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2017. – № 26 (1248). – 108 с.

Державне видання
Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого наказом МОН України від 21.12.2015 № 1328 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року»

Координаційна рада:
Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);
А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.;
С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;. М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф;
В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;
О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.;
П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;
М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:
Відповідальний редактор: О.А. Пермяков, д-р техн. наук, проф.
Заст. відповідального редактора: О. О. Клочко, д-р техн. наук, проф.
Відповідальний секретар: Є. В. Басова, канд. техн. наук, доц., М.С. Іванова, канд. техн. наук, доц.
Члени редколегії: С.С. Добротворський, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Ковальов, д-р техн. наук, проф.; Є.В. Мироненко, д-р техн. наук, проф.; В.С. Антонюк, д-р техн. наук, проф; М.М. Кане, д-р техн. наук, проф.; Ю.А. Сизий, д-р техн. наук, проф.; Д.В. Сталінський, д-р техн. наук.; М.С. Степанов, д-р техн. наук, проф.; В.А. Фадєєв, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Хіцан, д-р техн. наук, проф.; О.М. Шелковий, д-р техн. наук, проф.

У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Технології в машинобудуванні», включений у довідник періодичних видань бази даних ***Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)****. Вістник включений до міжнародної наукометричної бази* ***Index Copernicus*** *та індексується* ***Google Академия****.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол №6 від 07«липня» 2017 р.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

BULLETIN

OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY «KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

Series: « Techniques in a machine industry»

№ 17 (1239) 2017

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkov
NTU «KhPI»

Collected Works. Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv: NTU «KhPI» – 2017. – № 26 (1248). – 108 p.

State edition
Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy
КВ № 5256 from July 2, 2001

The collection is published in Ukrainian and Russian.

*Bulletin of National Technical University «KhPI» included in the «List of scientific professional editions of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences», approved by order of the (MES of Ukraine) of 21.12. 2015 № 1328 «*On *approval decisions Certifying Board* of the *Ministry* for *academic councils of 28 December 2015»*

Coordinating Board:
L. L. Tovazhnyanskyy, Dr. Tech. Sci., Prof. (**chief**);
K. A. Gorbunov, PhD. Tech. Sci., Docent. (**secretary**);
A. P. Marchenko, Dr. Tech. Sci.,Prof.; Ie.I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.;
Ie. Ie. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. V. Boiko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
F. F. Hladkyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. D. Hodlevskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.;
A. I. Hrabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof. V. H. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. D. Dmytryienko, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. V. Yepifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Iu. I. Zaitsev Dr. Tech. Sci., Prof.;
P. O. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.;
S. I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.;. M. A. Tkachuk Dr. Tech. Sci., Prof.;
V. I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; H. V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.;
O. K. Morachkovskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Nikolaienko, Dr. Tech. Sci., Prof.;
P. H. Pererva, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. A. Puliaiev, Dr. Tech. Sci., Prof.;
M. I. Ryshchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.;
H. M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof.

Editorial Board:
Editor: A.A. Permiakov, Dr. Tech. Sci., Prof.
Deputy editor: A. A. Klochko, Dr. Tech. Sci., Prof.
Secretary: Ie. V. Basova, PhD. Tech. Sci., Docent, M.S. Ivanova, PhD. Tech. Sci., Docent.
Members of the editorial board: S.S. Dobrotvorskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.D. Kovalev, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ye.V. Mironenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.S. Antonyuk, Dr. Tech. Sci., Prof.; M.M. Kane, Dr. Tech. Sci., Prof.; Iu.A. Syzyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; D.V. Stalinskyi, Dr. Tech. Sci.; M.S. Stepanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.A. Fadieiev, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.D. Khitsan Dr. Tech. Sci., Prof.; A.N. Shelkovyi, Dr. Tech. Sci., Prof.

In April 2013 Bulletin of National Technical University «KhPI» series «Technologies in mechanical engineering» included in the directory database of periodicals ***Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)****. The journal is included in the international science-based database* ***Index Copernicus*** *and indexed by the* ***Google Academy****.*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU «KhPI».
Protocol No 6 of July 07, 2017

© National Technical University «KhPI», 2017

УДК 621.9

Е.И. СОКОЛ, Г.И. ИЩЕНКО, А.Ю. ЧЕРКАССКИЙ, М.Г. ИЩЕНКО, А.В. ЛИННИК

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ДНЕСТРОВСКОЙ ГАЭС

В статті розглянуті технологічні особливості виробництва унікального енергетичного обладнання турбіни для Дністровської ГАЕС масою 900т, діаметром 12м. Науково-технічне співробітництво заводу «Турбоатом» та Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» дозволяє ефективно вирішити конструкторсько-технологічні завдання та впровадити в виробництво інноваційні наукоємні процеси виготовлення унікальних гідроагрегатів. Діяльність підприємства здійснюється замкнутому циклу: від дослідження, проектування, підготовки виробництва, виготовлення до шефмонтажу та техобслуговування поставленої техніки. Детально аналізуються технологічні особливості виготовлення основних деталей за видами виробництва в заготівельному металургійному, зварювальному, механіко-виробничому виробництві при використанні сучасного портально-фрезерного станку з ЧПУ мод.НС33-Вальдрих Кобург (Німеччина) з використанням унікальних пристосувань для фрезерування 5-ти метрових лопостей. Розроблені методи та засоби контролю унікальних деталей до механічної обробки та після використання нової координатно - вимірювальної руки машини «Фаро» (Франція) з програмним забезпеченням Delcam. Завдяки комплексному технічному переозброєнню з застосуванням науково-технічного та виробничого потенціалу створено унікальний комплексний замкнений технологічний процес виробництва гідроагрегатів Дністровської ГАЕС на найвищому світовому рівні.

Ключові слова Технологічні особливості, виробництво, унікальне енергетичне обладнання, турбіни для Дністровської ГАЕС, заготівельне, металургійне, зварювальне, механікозбірне виробництво, методика та засоби контролю комплексне технічне переозброєння.

В статье рассмотрены технологические особенности производства уникального энергетического оборудования турбины для Днестровской ГАЭС массой 900т, диаметром 12м. Научно-техническое сотрудничество завода «Турбоатом» и Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» позволяет эффективно решать конструкторско-технологические задачи и внедрять в производство инновационные наукоемкие процессы изготовления уникальных гидроагегатов. Деятельность предприятия осуществляется по замкнутому циклу: от исследования, проектирования, подготовки производства, изготовления до шефмонтажа и техобслуживания поставленного оборудования. Детально проанализированы технологические особенности изготовления основных деталей по видам производства в заготовительном металлургическом, сварочном, в механосборочном производстве при использовании модернизированного портально-фрезерного станка с ЧПУ мод. НС33-Waldrich Coburg (Германия) с использованием уникальнейших приспособлений для фрезерования 5-ти метровых лопастей. Разработаны методика и средства для контроля уникальнейших деталей до механической обработки и после с использованием новой координатно - измерительной руки машины «Фаро» (Франция) с программным обеспечением Delcam. Благодаря комплексному техническому перевооружению с применением научного, инженерного и производственного потенциала создан уникальный комплексный замкнутый технологический процесс изготовления гидроагрегата Днестровской ГАЭС на высочайшем мировом уровне.

Ключевые слова: технологические особенности, производство, уникальное энергетическое оборудование, турбины для Днестровской ГАЭС, заготовительное, металлургическое, сварочное, механосборочное производства, методика и средства контроля комплексное техническое перевооружение.

In the article technological features of production of the unique power equipment of the turbine for the Dnieper-Stara PSES with the mass of 900 tons, diameter of 12 m are considered. The scientific and technical cooperation of the Turboatom plant and the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" allows us to effectively solve design and technological problems and introduce innovative science-intensive processes for the production of unique hydrogages. The activity of the enterprise is carried out on a closed cycle: from research, design, preparation of production, production to installation supervision and maintenance of the supplied equipment. The technology of manufacturing the impeller of a hydroturbine is considered. On the accuracy and quality of its production depends on the efficiency of the pump / turbine, and it must be in the pumping mode 92.8% in the turbine mode 94.0%. Technological peculiarities of manufacturing the main parts by kinds of production in procurement metallurgy, welding, in mechanic-assembly production are analyzed in detail using the modernized portal-milling machine with CNC mod. NS33-Waldrich Coburg (Germany) using unique devices for milling of 5-meter blades.
Methods and tools for controlling the unique parts before machining and then using the new coordinate - measuring arm of the Faro machine (France) with the Delcam software have been developed. Thanks to the complex technical re-equipment with the use of scientific, engineering and production potential, a unique complex closed technological process for the manufacture of the hydroelectric unit of the Dniester PSPP at the highest world level has been created.

Keywords: technological features, production, unique energy equipment, turbines for Dniester hydroelectric power station, procurement, metallurgical, welding, mechanized assemblies, methods and means of control, complex technical re-equipment.

Постановка проблемы. Производство энергетического оборудования – это сложный наукоемкий и комплексный технологический процесс, для реализации которого необходимо иметь сильный научно-инженерный потенциал и мощную интеллектуальную и производственную базу. Такими характеристиками обладает современный ПАО «Турбоатом». Именно постоянный поиск новых технологических решений и применение инновационных методик изготовления трудоемкой продукции позволяет предприятию оставаться конкурентоспособным и востребованным.

Цель работы. Создание наукоемкого производства для изгототвления гидротурбин мирового уровня.

Основной материал. Деятельность предприятия осуществляется по замкнутому циклу: от исследования, проектирования, подготовки производства, изготовления до шефмонтажа и техобслуживания поставленного оборудования [1, 2, 3, 5].

Остановимся на технологических особенностях производства турбины для Днестровской ГАЭС.

Это уникальный проект гидравлической электростанции на Украине и изготовление гидротурбины так же уникальный технологический процесс (рис.1).

Вес отдельных деталей и узлов турбины впечатляет:

- щит кольцевого затвора - m=80т. Ø=10,7м;
- вал турбины – m=100т. L = 8,5м;
- рабочее колесо – m=120т. Ø = 7,3м;
- статор турбины (в сборе) – m=300т. Ø = 12,2м;

© Е.И. Сокол, Г.И. Ищенко, А.Ю. Черкасский, М.Г. Ищенко, А.В. Линник, 2017

- крышка турбины – m=370т. Ø = 12м;
- направляющий аппарат (в сборе) m=900т, Ø=12м [2, 3, 4].

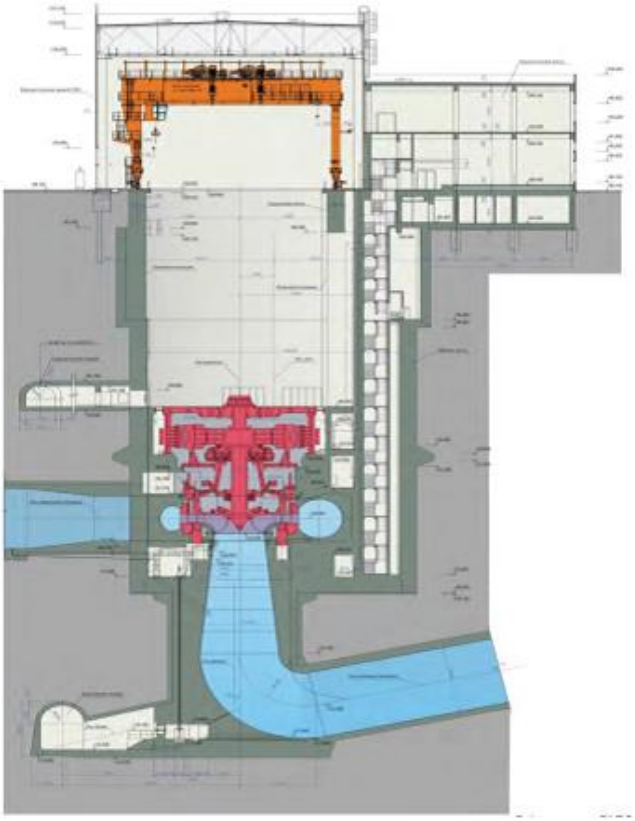


Рис.1 – Разрез по агрегату Днестровской ГАЭС

Что подтверждает тот факт, что в производственном процессе имеет место также внешняя кооперация. Представим отдельные новые технологии, которые выполняются на ПАО «Турбоатом» в настоящее время.

В качестве примера реализации сложного техологического решения рассмотрим технологию изготовления рабочего колеса гидротурбины, так как от точностных и качественных характеристик этого изделия зависит эффективность работы насос/турбины, которая эксплуатируется в насосном режиме 92,8% в турбинном режиме – 94,0%.

В рабочем колесе 7 лопастей (рис.2). Вес заготовки 1 лопасти – 10т., длина – 5м. От точности изготовления лопасти зависит точность изготовления рабочего колеса, что прямопропорционально эффективности работы агрегата [6].

Рис.2 – Рабочее колесо Днестровской ГАЭС

В металлургическом производстве: заготовки лопастей и лопаток (жидкий вес 16т.) при производстве четвертого гидроагрегата отлиты в литейном цехе ПАО «Турбоатом» цельными вместо сварнолитых из частей, как это было раньше. Это стало возможным благодаря проведенной модернизации и замене металлургического оборудования на формовочном, обрубном, термическом, литейном участках и перехода на новую технологию, основанную на фуран – процессе и использование блочно – модульного комплекта оснастки (рис.3, рис.4).

В заготовительно – сварочном производстве: для сборки, сварки и обрубки крупногабаритных металлоконструкций были созданы три новых участка, которые оснащены современным оборудованием.

Рис.3 – Новый мобильный смеситель ф.IMF (Италия)

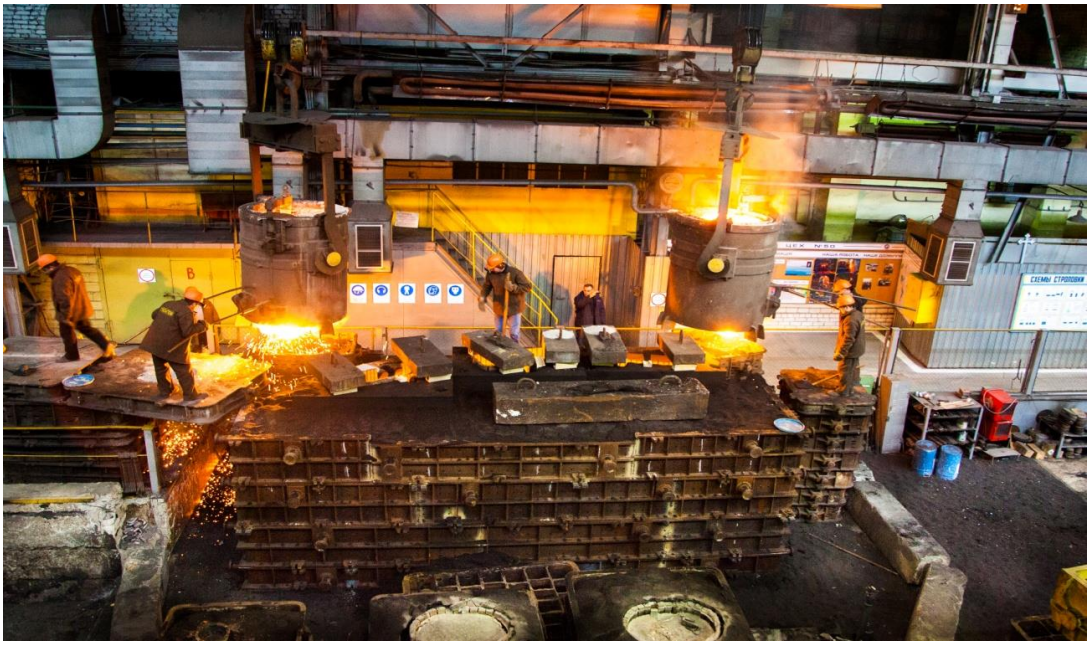


Рис.4 – Заливка лопасти рабочего колеса по новой технологии

А также модернизированы три газорезательные линии «Мессер Гресхайм» (Германия) для автоматической резки листового проката (рис. 5 и рис. 6).

Сборка и сварка рабочего колеса выполняется на специализированном участке, оснащенном оборудованием для электроподогрева, оборудованием для сварки одновременно всех 7 лопастей. Сварка производится аустенитными электродами европейских производителей. Термическая обработка после сварки выполняется в шахтной электропечи Ø8м. Контроль сварных швов 100% (визуальный, УЗК, ЦД).

В механосборочном производстве при изготовлении гидравлической турбины была разработана и внедрена в производство новая технология механической обработки лопастей на базе станков с ЧПУ. Суть технологии заключается в обработке сложнопрофильного изделия по управляющим программам, вместо обработки по шаблонам и копирами [7].

Рис. 5 – Современный участок сварки ПАО «Турбоатом»

Рис. 6 – Рис.6 Рабочее колесо Днестровской ГАЭС после сварки

Внедрение такой технологии на ПАО «Турбоатом» стало возможным за счет применения модернизированных обрабатывающих центров «Вальдрих Кобург» (Германия), «Шкода» (Чехия), «Иноченти» (Италия). Качественное решение задачи сложнопрофильного формообразования на металлообраатывающем оборудовании потреповало проектирования и изготовлена специальной оснастки, разработки управляющих программ для обработки и контроля деталей.

Обработка ведется с использованием 5 – координатной головки и современного режущего инструмента (рис.7). Лопасти – это детали сложного профиля, которые имеют теоретический чертеж, подтвержденный лабораторными модельными испытаниями [1, 2, 4, 6]. Лопасти в металле должны соответствовать теоретическому чертежу т.к. это обеспечивает КПД гидромашины. Обработка профиля лопасти, разделки под сварку по стороне обода и ступицы рабочего колеса, входной и выходной кромок выполняется на специальных установочных приспособлениях, позволяющих позиционировать лопасть в оптимальное положение для фрезерования (рис.8, рис.9)

Рис.7 – Модернизированный портально-фрезерный станок
мод. HC33-Waldrich Coburg (Германия)

Рис.8 – Приспособление для фрезерования «тыльной» стороны лопасти

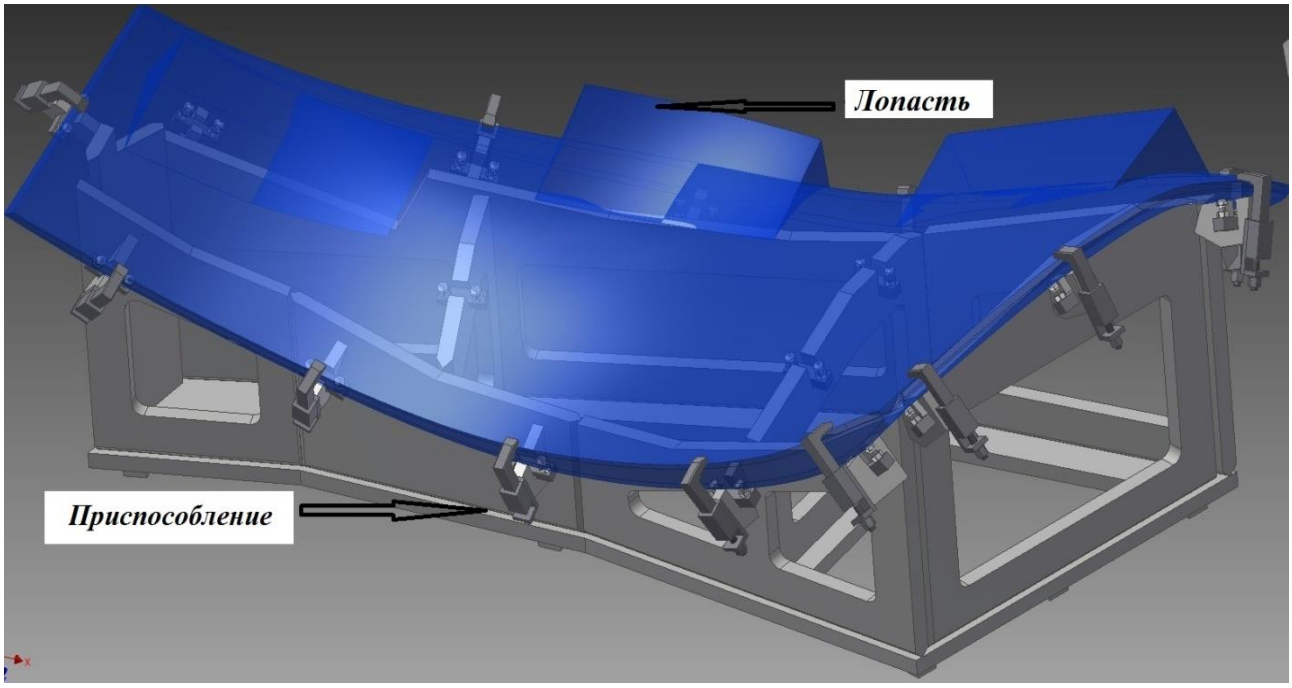


Рис 9 – Приспособление для фрезерования «рабочей» стороны лопасти

Рис. 10 – Фрезерование лопасти на станке с ЧПУ фирмы Waldrich Coburg (Германия)

Разработанное приспособление значительно повышает жесткость установки, оптимизирует вылет режущего инструмента на участках криволинейных перепадов сложного профиля лопатки, раскрывает «труднодоступные зоны» на переменном профиле лопасти.

Контроль деталей до механической обработки и после нее выполняется с использованием новой координатно - измерительной руки «Фаро» (Франция), высокоточная робота которой координируется с использование интегрированного программного обеспечения Delcam [1, 2]. Контрольная разметка лопасти перед механической обработкой – очень важная операция и необходима для равномерного распределения припусков в заготовке (рис.12).

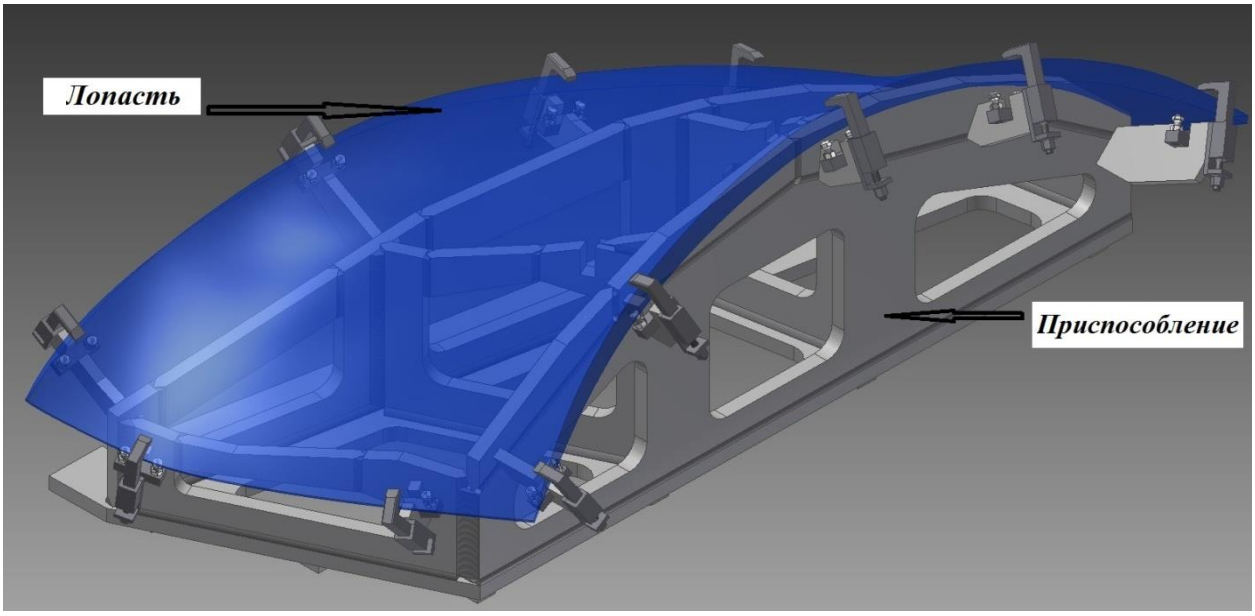


Рис. 11 – Контроль профильных точек на станке после фрезерования

Рис.12 – Контрольная разметка лопасти под механическую обработку

Выводы. Таким образом, имея современные обрабатывающие центры с ЧПУ, специальные установочные приспособления, высокопроизводительный инструмент, высоточные управляющие программы мы получаем точно и качественно обработанные детали.

Благодаря проведенной работе по техническому перевооружению металлургического, заготовительно – сварочного, механосборочного производств с 2008г. по 2016г. в преддверии подготовки к изготовлению четвертого гидроагрегата Днестровской ГАЭС на «Турбоатоме» замкнули производство рабочих колес.

Рис.13 – Отгрузка рабочего колеса Ø = 7,3м , m=120т. спецтранспортом

Эти новые решения и технологии позволили значительно сократить циклы производства, повысить качество изготовления продукции и вернуть отдельные детали из внешней кооперации на собственное производство.

Список литературы

1. *Субботин, В. Г.* «Турбоатом» – это 80 лет инноваций, надежности и успеха / В. Г. Субботин, интервью. Провела: О. Щукина // Турбоатом: газ. трудового коллектива ОАО «Турбоатом». – 6 февр. 2014 г. – № 1 (4784). – С. 1-2. – Режим доступа : http:/ /www .turboatom. com.ua/content/documents /27/2673/files/2014-02-06.pdf.
2. *Угольников В. В.* Создание крупных гидротурбин и обратимых гидромашин / В. В. Угольников, И. С. Веремеенко // Энергомашиностроение. - 1986. - № 1. - С. 35-39.
3. *Веремеенко И. С* Опыт модернизации гидротурбинного оборудования в ОАО «Турбоатом» // Вестн. НТУ «ХПИ». -2001. - Вып. 129. - С. 10-22.
4. *Турбоатому - 75*. История, достижения, перспективы / В. Г. Субботин (ред.), А. А. Бугаец (ред.). – Харьков : Золотые страницы, 2009. – 200 с. 3. Левченко, Е. В. Опыт ОАО «Турбоатом» в разработке и модернизации турбин для АЭС / Е. В. Левченко, В. Л. Швецов И. И. Кожешкурт, А. Н. Лобко // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьк. политехн. ин-т». Сер.: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – 2010. – № 3. – С.
5. *Добротворский С.С.* Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.55(42). – С. 25-31.
6. *Добротворский С.С.* Исследование оптимального угла наклона концевой сферической фрезы относительно обрабатываемых поверхностей деталей сложной формы с переменной жесткостью / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, М.И. Гасанов и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2015. – Вып. 69. – С. 108 – 112.
7. *Басова Е.В.* Обеспечение точности изготовления сложнопрофильных поверхностей концевыми фрезами на обрабатывающих центрах/ *Е.В. Басова* // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении – 2015: сборник научных трудов [Текст] / Закрытое акционерное общество «ОНИКС». – Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2015. – 235 с.: ил, табл.; – С. 153-162.

References (transliterated)

1. *Subbotin, V.* "Turboatom" - 80 Years of Innovation, Reliability and Success / VG Subbotin, interview. Spent: O. Shchukin // Turboatom: gas. Labor collective of OJSC "Turboatom". - Feb. 6 2014 No. 1 (4784). pp. 1-2. Access mode: http://www.turboatom. com. ua/content/documents/27/2673/files/2014-02-06.pdf.
2. *Ugolnikov V., Veremeenko I.* Sozdanie krupnyih gidroturbin i obratimyih gidromashin [*Creation of large hydro turbines and reversible hydromashines*]. Energomashinostroeniya. 1986 - No 1. pp. 35-39.
3. *Veremeenko I.* Opyit modernizatsii gidroturbinnogo oborudovaniya v OAO «Turboatom» [*With the experience of modernization of hydro turbine equipment at OAO Turboatom*]. Vestn. NTU "KhPI". 2001. No129. pp. 10-22.
4. *Turboatom - 75*. History, achievements, prospects / VG Subbotin (ed.), AA Bugaets (ed.). - Kharkiv: Golden Pages, 2009. - 200 p. 3. Levchenko, EV Experience of OJSC "Turboatom" in the development and modernization of turbines for nuclear power plants / E.V. Levchenko, V. L. Shvetsov, I. I. Kozheshkurt, A. N. Lobko // Vestn. National Tech. Un "Kharkiv. Polytechnic In-t ". Sir: Energy and heat engineering processes and equipment. 2010. No. 3. pp. 5-11
5. *Dobrotvorskiy S.S., Basova E.V., Dobrovolskaya L.G. etc.* Povyishenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitelnogo proizvodstva v sovremennyih usloviyah [*Increase of competitiveness of domestic machine-building production in modern conditions*] Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. No.55(42). pp. 25-31.
6. *Dobrotvorskii S., Basova E., Hasanov M., Golovatii R.* Issledovanie optimalnogo ugla naklona kontsevoy sferi-cheskoy frezyi otnositelno obrabatyivaemyih poverhnostey detaley slozhnoy formyi s peremennoy zhestkostyu [Research optimal value of inclination angle in ball end milling relative to machined surfaces parts complex shapes with variable stiffness]. Otkryityie informatsionnyie i kompyuternyie integriro-vannyie tehnologii: sb. nauch. Tr Kharkov. KhAI. , 2015, vol 69. pp. 108-112.
7. *Basova E.V.* Obespechenie tochnosti izgotovleniya slozhnoprofilnyih poverhnostey kontsevyimi frezami na obrabatyivayuschih tsentrah [Ensuring the accuracy of the manufacture of sophisticated surfaces with end mills at machining centers]. Problemyi proektirovaniya i avtomatizatsii v mashinostro-enii – 2015: sbornik nauchnyih trudov. Zakryitoe aktsionernoe obschestvo «ONIKS». – Irbit: ZAO «ONIKS», 2015. – 235 p.: il, tabl. pp. 153-162.

Поступила (received) 16.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технологічне забезпечення виготовлення гідравлічної турбіни для Днестровской ГАЕС / Є.И. Сокол, Г.І. Іщенко, А.Ю. Черкасский, М.Г. Іщенко, О.В. Линник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 5–13. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Технологическое обеспечение изготовления гидравлической турбины для Днестровской ГАЭС / Е.И. Сокол, Г.И. Ищенко, А.Ю. Черкасский, М.Г. Ищенко, А.В. Линник // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 5–13. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Technological support for the manufacture of a hydraulic turbine for the Dniester PSPP / E. Sokol, G. Ishchenko, A. Cherkasy, M. Ishchenko, A. Linnik // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P5–13. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сокол Євген Іванович - доктор технічних наук, професор, ректор Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", Харьків, тел.: (057) 700-15-64; omsroot@kpi.kharkov.ua;

Сокол Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор, ректор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, тел.: (057) 700-15-64; omsroot@kpi.kharkov.ua;

Sokol Evgeny Ivanovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, tel.: тел.: (057) 700-15-64; omsroot@kpi.kharkov.ua;

Іщенко Григорій Іванович - головний інженер ПАТ «Турбоатом», Харків, тел.: 38 (0572) 90-22-08; office@turboatom.com.ua;

Ищенко Григорий Иванович – главный инженер ПАО «Турбоатом», Харьков, тел.: 38 (0572) 90-22-08; office@turboatom.com.ua;

Ishchenko Grigory Ivanovich - Chief Engineer of PJSC "Turboatom", Kharkov, tel.: тел.: 38 (0572) 90-22-08; office@turboatom.com.ua;

Черкасский Алексей Юрьевич - перший заступник генерального директора ПАТ «Турбоатом», Харків, тел.: +38 (057) 349-24-50, office@turboatom.com.ua;

Черкасский Алексей Юрьевич – первый заместитель генерального директора ПАО «Турбоатом», Харьков, тел.: +38 (057) 349-24-50, office@turboatom.com.ua;

Cherkassky Alexey Yurievich - First Deputy General Director of PJSC "Turboatom", Kharkiv, tel.: +38 (057) 349-24-50, office@turboatom.com.ua;

Іщенко Михайло Григорович - начальник технологічного відділення ПАО «Турбоатом», Харків, тел.: +38 (057) 349-24-50, office@turboatom.com.ua;

Ищенко Михаил Григорьевич – начальник технологического отдела ПАО «Турбоатом», Харьков, тел.: +38 (057) 349-24-50, office@turboatom.com.ua;

Ishchenko Mikhail Grigorievich - Chief of Technology Department of PJSC "Turboatom", Kharkiv, tel.: +38 (057) 349-24-50, office@turboatom.com.ua;

Линник Александр Васильович - головний конструктор гідротурбінів ПАТ «Турбоатом», Харків, тел.: +38 (057) 349-24-50, office@turboatom.com.ua;

Линник Александр Васильевич – главный конструктор гидротурбин ПАО «Турбоатом», Харьков, тел.: +38 (057) 349-24-50, office@turboatom.com.ua;

Linnik Alexander Vasilievich - Chief Designer of the hydro turbines of PJSC "Turboatom", Kharkiv, tel.: +38 (057) 349-24-50, office@turboatom.com.ua.

УДК 621.9

Г.И. КОСТЮК

СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ НИТРИДНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА ТВЁРДОМ СПЛАВЕ Т12А

В роботі була досліджена можливість створення високоентропійних нітридних нанопокриттів на твердому сплаві Т12А на основі гафнію, цирконію, молібдену, вольфраму, ітрію і нікелю. Проведено дослідження отримання нітридних покриттів і нітридів безпосередньо в тілі матеріалу при енергіях іонів в діапазоні від 200 до 2 ·10⁴ еВ з зарядовими числами від 1 до 3. Отримані важливі характеристики: об'єм зерна для всіх перерахованих іонів і іонів азоту і глибини їх залягання , що дозволяє оцінити шари наноструктур або субмікроструктур, у яких можуть бути створені ці високоентропійні покриття. Показано, що є можливість уникнути отримання інтерметаллідов завдяки високій рухливості іонів азоту.

Ключові слова: висоентропійні покриття, субмікроструктури, наноструктури, твердий розчин, інтерметалліди, нітрид.

В работе была исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных нанопокрытий на твёрдом сплаве Т12А на основе гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Проведено исследование получения нитридных покрытий и нитридов непосредственно в теле материала при энергиях ионов в диапазоне от 200 до $2\cdot10^4$ эВ с зарядовыми числами от 1 до 3. Получены важные характеристики: объём зерна для всех перечисленных ионов и ионов азота и глубины их залегания, что позволяет оценить слои наноструктур или субмикроструктур, которые могут быть образованны этими высоэнтропийными покрытиям. Показано, что есть возможность избежать получения интерметаллидов благодаря высокой подвижности ионов азота.

Ключевые слова: высоэнтропийные покрытия, субмикроструктуры, наноструктуры, твёрдый раствор, интерметаллиды, нитриды.

The possibility of creating highly entropic nitride nanocoats on a solid alloy T12A based on hafnium, zircon, molybdenum, tungsten, yttrium and nickel was investigated. An investigation was made of the production of nitride coatings and nitrides directly in the body of the material at ion energies in the range from 200 to $2\cdot10^4$ eV with charge numbers from 1 to 3. Important characteristics were obtained: the grain volume for all the ions and nitrogen ions listed and their depth, which allows us to evaluate the layers of nanostructures or submicrostructures that can be formed by these high-entropy coatings. Moreover, it is shown that it is possible to avoid the production of intermetallic compounds due to the high mobility of nitrogen ions.

Keywords: high-entropy coatings, submicrostructures, nanostructures, solid solution, intermetallic compounds, nitrides.

Введение. В настоящие время проводятся исследования высокоэнтропийных сплавов, которые благодаря образованию твёрдых растворов имеют высокую твёрдость и обладают другими высокими физико-механическими характеристиками [1-3]. Есть попытки создавать покрытия из высокоэнтропийных сплавов [4] и даже экспериментально получать нитриды на основе высокоэнтропийных сплавов, но, к сожалению теоретических работ, в области создания нитридных высокоэнтропийных покрытий нет.

Всё вышеизложенное говорит об актуальности и своевременности создания теории получения наноструктурных высокоэнтропийных покрытий на материале режущих инструментов.

Появление нового класса материалов высокоэнтропийных сплавов, их применение может существенно улучшить физико-механические характеристики (ФМХ) деталей и режущего инструмента, но в них входят дорогостоящие составляющие: гафний, цирконий, вольфрам, молибден и другие редкоземельные металлы. Используя эти металлы можно создавать нитридные покрытия на поверхности РИ и их характеристики могут быть такими же или даже выше, чем у высокоэнтропийных сплавов.

Высокоэнтропийные сплавы требуют, чтобы в их составе было минимум 5 различных элементов, с увеличением числа элементов энтропия растет, очевидно, то же самое будет и с увеличением числа карбидов, нитридов, оксидов и боридов. Причём одного элемента должно быть не более 30%. Очевидно у таких покрытий появляются новые возможности, о которых мы ещё и не подозреваем, так как они могут создавать твёрдые растворы, которые могут обладать сверх высокими ФМХ так и образовывать интерметаллиды, которые обладаю высокой пластичностью, что тоже при их малом количестве реализуются свойства покрытия, которое будет эффективно противостоять ударным нагрузкам. Всё это говорит о своевременности и важности проводимых исследований.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

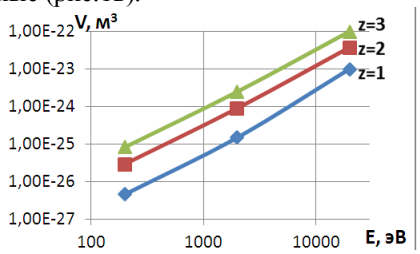
Состояние вопроса. В настоящие время широко будируется вопрос о создании высокоэнтропийных сплавов, которые могут найти широкое применение в технике за счёт высокой твёрдости, высокой прочности при значительных температурах, существенно снижается ползучесть по сравнению с традиционными конструкционными материалами, что тоже является важной характеристикой [1-5]. В тоже время во-

© Г.И. Костюк, 2017

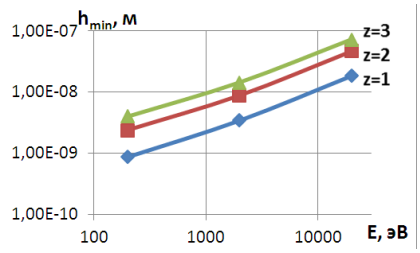
прос получения НС как на высокоэнтропийных сплавах, так и в покрытиях из составляющих эти сплавы, даже экспериментально практически не изучен (существуют отрывочные данные о возможности получения НС), а работ в теоретическом плане по получению НС за исключением наших [6-11] нет.

Всё это говорит о том, что есть существенная необходимость в развитии работ по получению покрытий из нитридов, карбидов, боридов, оксидов и других твердых соединений в случае образования высоэнтропийного покрытия. Выше изложенное говорит о важности и актуальности проводимых теоретических исследований в направлении получения высокоэнтропийных нитридных наноструктурных покрытий

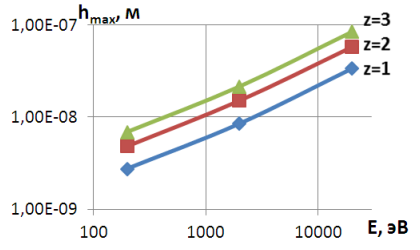
Поэтому была исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных покрытий на твёрдом сплаве Т12А, рассматривалась возможность нанесения нитридов гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Для этого на основе совместной задачи теплопроводности и термоупругости определялся объём зерна и глубины его залегания для рассмотренных элементов и азота, так для азота зависимости объёма зерна максимальной и минимальной глубины залегания представлены на рис.1. Видно, что объём, но для малых энергий порядка 200 эВ, соответствует нанозерну, тогда как при больших энергиях он их превышает (рис.1а), глубины залегания объёма в первом случае лежат в диапазоне $8{,}6\cdot10^{-10}$ – $3{,}9\cdot10^{-9}$ м — минимальные (рис.1в) и $2{,}7\cdot10^{-9}$ - $6{,}8\cdot10^{-9}$ м — максимальные (рис.1в).



а



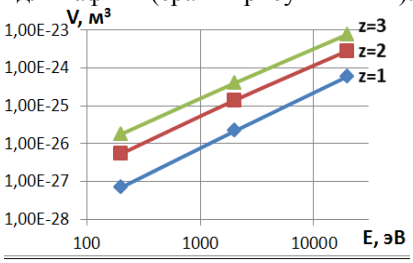
б



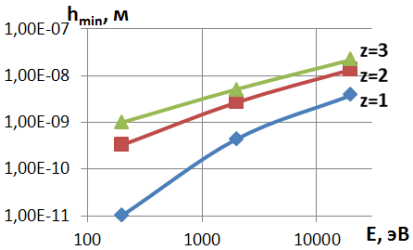
в

Рис.1 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема, б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов азота (N^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А; в –максимальной глубины залегания НК при действии ионов азота (N^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А

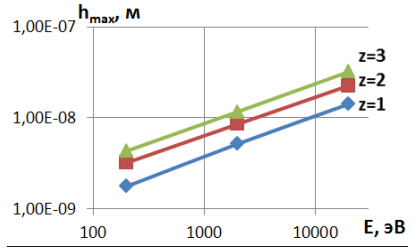
На рис.2 для ионов гафния представлены все 3 зависимости. Видно, что объём соответствующий наноструктурам (НС) реализуется до энергии ионов порядка 700-800 эВ и глубины: для минимальной 0 — $2{,}2\cdot10^{-8}$ м; для максимальной — $1{,}8\cdot10^{-9}$ – $3{,}2\cdot10^{-8}$ м. Видно, что с ростом массы иона объёмы НС и глубины их залегания существенно уменьшаются. Эта тенденция прослеживается практически для всех рассмотренных ионов. Для того чтобы образовались нитриды, необходимо, чтоб заряд и энергия ионов азота были-таки, чтобы глубина его залегания была близка полученным для гафния (сравни рисунки 1 и 2).



а



б



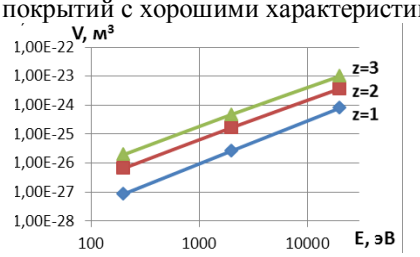
в

Рис.2 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов гафния (Hf^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов гафния (Hf^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А

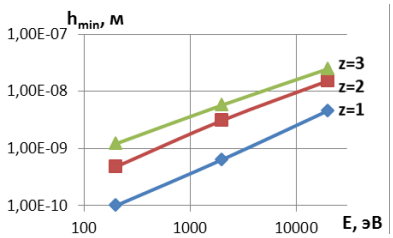
Перейдя к зависимостям для циркония Zr^+ (рис. 3) получим, что практически для всех исследуемых энергий реализуются НС. Причём при 200 эВ глубины залегания составляют: минимальная – 0 – $6{,}3\cdot10^{-10}$ м; максимальная – 3,34 10^{-9} – 5,43 10^{-9} м. При 2000 эВ минимальные – $6{,}37\cdot10^{-10}$ – $5{,}37\cdot10^{-9}$ м; максимальные – 5,4 10^{-9} – 1,25 10^{-8} м. Для 20 КэВ для минимальной глубины залегания – $4{,}6\cdot10^{-9}$ – 2,48 10^{-8} м; для максимальной – $1{,}54\cdot10^{-8}$ – $3{,}52\cdot10^{-8}$ м.

Сравнения глубин залегания НС для ионов гафния и циркония с проникновением ионов азота видим, что многие энергии азота не могут быть использованы так как их глубина проникновения больше и во многих из режимов не будут образовываться нитриды, а будет довольно большое количество интерметаллидов, которые обладают малыми физико-механическими характеристиками, а следовательно

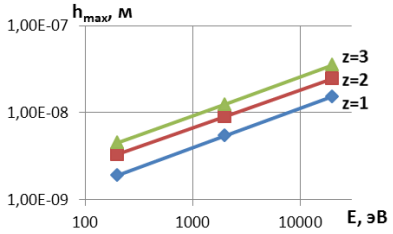
будут зоны в материале с пониженными свойствами, что не обеспечит появление высоко энтропийных нитридных покрытий с хорошими характеристиками.



а



б



в

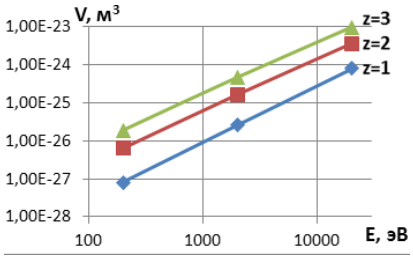
Рис.3 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов циркония Zr^+ с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для T12A; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов циркония Zr^+ с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для T12A

Для молибдена (Mo^+) глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – 0 – $1{,}18\cdot10^{-9}$ м, максимальная – $1{,}89\cdot10^{-9}$ – $4{,}49\cdot10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $6{,}12\cdot10^{-10}$ – $5{,}65\cdot10^{-9}$ м; максимальная – $5{,}59\cdot10^{-9}$ – $1{,}23\cdot10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $4{,}47\cdot10^{-9}$ – $2{,}44\cdot10^{-8}$ м; максимальная – $1{,}52\cdot10^{-8}$ – $3{,}48\cdot10^{-8}$ м.

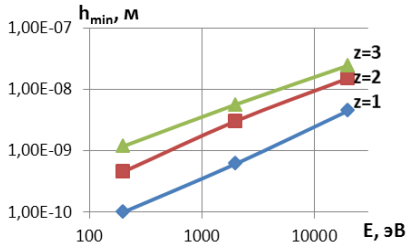
Для ионов вольфрама (W^+) представлены аналогичные графики (рис.5). Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – 0 – $9{,}89\cdot10^{-10}$ м, максимальная – $1{,}77\cdot10^{-9}$ – $4{,}33\cdot10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $4{,}38\cdot10^{-10}$ – $5{,}1\cdot10^{-9}$ м; максимальная – $5{,}17\cdot10^{-9}$ – $1{,}17\cdot10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $3{,}79\cdot10^{-9}$ – $2{,}19\cdot10^{-8}$ м; максимальная – $1{,}42\cdot10^{-8}$ – $3{,}20\cdot10^{-8}$ м.

Видно, что глубины залегания наноструктур значительно отличаются от необходимых для ионов азота и нужно очень аккуратно выбирать энергии и заряды с целью получения нитридов на определённой глубине.

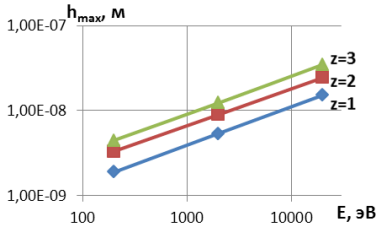
Для ионов иттрия (Y^+) аналогичные зависимости представлены на рис.6. Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – 0 – $1{,}23\cdot10^{-9}$ м, максимальная – $1{,}92\cdot10^{-9}$ – $4{,}54\cdot10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $6{,}53\cdot10^{-10}$ – $5{,}79\cdot10^{-9}$ м; максимальная – $5{,}45\cdot10^{-9}$ – $1{,}25\cdot10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $4{,}65\cdot10^{-9}$ – $2{,}49\cdot10^{-8}$ м; максимальная – $1{,}55\cdot10^{-8}$ – $3{,}55\cdot10^{-8}$ м.



а

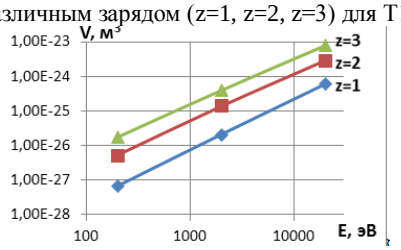


б

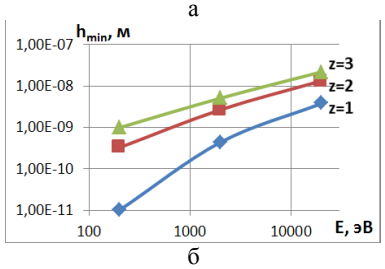


в

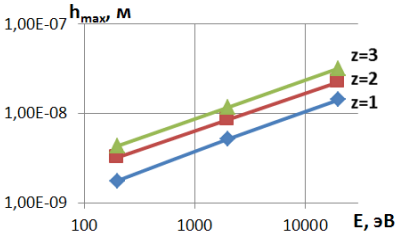
Рис.4 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов молибдена (Mo^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для T12A; в –максимальной глубины залегания НК при действии ионов молибдена (Mo^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для T12A



а



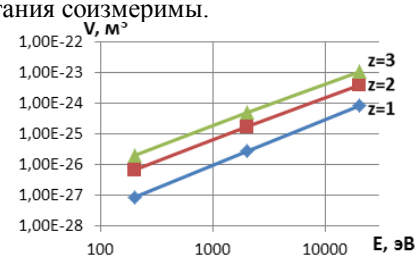
б



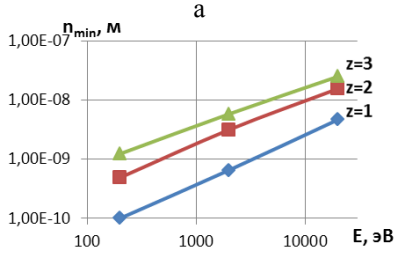
в

Рис.5 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов вольфрама (W^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для T12A; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов вольфрама (W^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для T12A

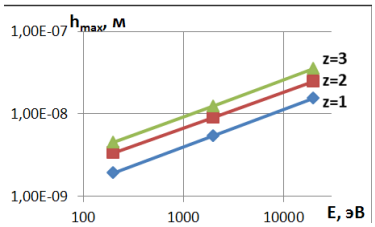
Видно, что в этом случае практически, для всех энергий глубины малы, исключение представляет только энергия 20 КэВ, которые далеко не всегда можно реализовать в данной установке, поскольку энергия азота намного меньше, при которой их глубины залегания соизмеримы.



а



б



в

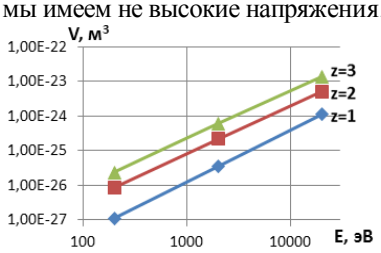
Рис.6 – Зависимости объема нанокластера (НК): Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А

Для никеля (Ni^+) зависимости объёма НС и минимальной и максимальной глубины залегания представлены на рисунке 7.

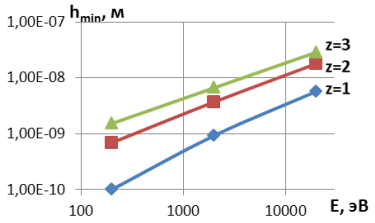
Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – 0 – $1{,}52\cdot10^{-9}$ м, максимальная – $2{,}1\cdot10^{-9}$ – $4{,}79\cdot10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $9{,}24\cdot10^{-10}$ – $6{,}63\cdot10^{-9}$ м; максимальная – $5{,}77\cdot10^{-9}$ – $1{,}35\cdot10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $5{,}7\cdot10^{-9}$ – $2{,}87\cdot10^{-8}$ м; максимальная – $1{,}7\cdot10^{-8}$ – $3{,}95\cdot10^{-8}$ м.

Для никеля глубины залегания ближе к глубинам залегания азота, что способствует эффективному образованию НС из нитридов.

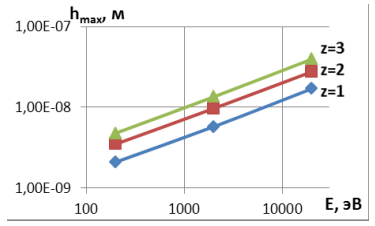
Уменьшаются минимальная и максимальная глубины залегания зерна с увеличением массы иона, а также не значительно уменьшаются объёмы зерна. Зона энергии, где возможно получение наноструктур, увеличивается, что положительно сказывается на физико-механических характеристиках покрытия, которое при наноструктурном зерне имеет большую микротвёрдость, предел текучести, предел прочности, повышается также коррозионная стойкость при этом увеличивается способность воспринимать ударные нагрузки за счёт снижения модуля упругости. Это позволяет выдерживать высокие нагрузки в зоне упругости, то есть при больших деформациях мы имеем не высокие напряжения.



а



б



в

Рис.7 – Зависимости объема нанокластера (НК): а – зависимость общего объема; б – минимальной глубины залегания НК при действии ионов никеля (Ni^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А; в – максимальной глубины залегания НК при действии ионов никеля (Ni^+) с различным зарядом (z=1, z=2, z=3) для Т12А

Мы рассмотрели возможность образования нитридов с учётом пространственного характера действия ионов азота и основных металлов. Реализовать высокоэнтропийное покрытие с 6 металлами можно в установки ВУ2-МБС, где есть четыре испарителя, в двух из которых будут находиться катоды из чистых металлов, а в остальных 2-х двухкомпонентные катоды. Вот так, например, если один из катодов будет из ЦГ20 (20%Hf+ 80%Zr) для того, чтобы обеспечить получение высокоэнтропийного покрытия необходимо, чтобы гафния было 7,5 %, а циркония 30% - максимально возможное количество одного компонента в высокоэнтропийном покрытии. Тогда расчёты показывают, что остальные элементы должны составлять 15,6225 % как в 2-х компонентном катоде, так и в 2х компонентных катодах.

Проведенные расчеты показывают, что время работы катода с материалом ЦГ 20 должно быть в 4 раза меньше, чем время действия работы остальных, что позволит обеспечить требуемое соотношение компонентов. Работа этого катода должна быть периодической, чтобы обеспечить получение соответствующих соотношения компонентов в высокоэнтропийном нитридном покрытии с минимальным количеством интерметалидов и аморфной фазы.

Видно, что необходимо обеспечить пространственно-временной закон распределения ионов в материале детали с целью получения эффективных высокоэнтропийных нитридных покрытий.

Выводы. В результате совместного действия всех рассмотренных сортов ионов мы можем получить высокоэнтропийное покрытие, а с учётом действия ионов

азота (выбрав соответствующую энергию ионов) получаем высокоэнтропийное нитридное наноструктурное покрытие.

В заключение можно отметить, что благодаря созданию слоёв из высокоэнтропийных нитридных наноструктурных покрытий мы можем конструировать эффективный режущий инструмент высокой работоспособности.

Показано, что для получения эффективных высокоэнтропийных покрытий необходимо за счёт управления установкой обеспечить соответствующий пространственно-временной закон распределения ионов в материале детали.

Список литературы

1. J. W. Yeh, Y. L. Chen, S. J. Lin, S. K. Chen, "High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation", Materials Science Forum, Vol. 560, pp. 1-9, 2007
2. Yong Zhang, Ting Ting Zuo, Zhi Tang, Michael C. Gao, Karin A. Dahmen, Peter K. Liaw, Zhao Ping Lu, Microstructures and properties of high-entropy alloys, Pages 1-93 , 2014
3. М.В Ивченко, В.Г Пушин,.N. Wanderka Високоентропійні еквіатомні сплави AlCrFeCoNiCu: гіпотези и експериментальні факти, Журнал технічної фізики, 2014, том 84, вип. 2/ стр.57-64
4. И.В.Блинков, А.О.Волхонский, В.Н.Аникин, М.И.Петржик, Д.Е.Деревцова Фазовый состав и свойства износостойких Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N покрытий, полученных методом физического осаждения из газовой фазы, Физика и химия обработки материалов, 2010, том 37, стр. 37-44
5. А.Д. Погребняк, А.А. Багдасарян, И.В. Якущенко, В.М. Береснев Структура и свойства высокоэнтропийних сплавов и нитридних покрытий на их основе, Успехи химии 83 (11) стр.1027-1061 (2014 г.)
6. 1.Костюк Г. И., Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наносруктурными модифицированными слоями: Монография-справочник: в 2 кн./Г.И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
7. Костюк, Г.І. Ефективний інструмент з нанопокриттям і наноструктурних Модифікаційний шарами [Текст]: моногр.-довід .: в 2 кн. / Г.І. Костюк. Х .: Вид-во. Планета-принт. Кн. 2. Лазерні технології, 2017. 507 с.
8. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
9. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
10. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. − Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
11. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.

Bibliography (translitered)

1. J. W. Yeh, Y. L. Chen, S. J. Lin, S. K. Chen, "High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation", Materials Science Forum, Vol. 560, pp. 1-9, 2007
2. Yong Zhang, Ting Ting Zuo, Zhi Tang, Michael C. Gao, Karin A. Dahmen, Peter K. Liaw, Zhao Ping Lu, Microstructures and properties of high-entropy alloys, Pages 1-93 , 2014
3. M.V Ivchenko, V.G Pushin,.N. Wanderka Visokoentropijni ekviatomni splavi AlCrFeCoNiCu: gipotezi i eksperimental'ni fakti, ZHurnal tekhnichnoї fiziki, 2014, vol 84, essue. 2/ pp.57-64.
4. I.V.Blinkov, A.O.Volhonskij, V.N.Anikin, M.I.Petrzhik, D.E.Derevcova Fazovyj sostav i svojstva iznosostojkih Ti-Al-Cr-Zr-Nb-N pokrytij, poluchennyh me-todom fizicheskogo osazhdeniya iz gazovoj fazy , Fizika i himiya obrabotki materialov, 2010, vol 37, pp. 37-44
5. A.D. Pogrebnyak, A.A. Bagdasaryan, I.V. YAkushchenko, V.M. Beresnev Struktura i svoj-stva vysokoehntropijnih splavov i nitridnih pokrytij na ih osnove, Uspekhi himii 83 (11) str.1027-1061 (2014 g.)
6. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem*: sprav [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.
7. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem*: sprav [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkov, Planeta print, 2017. 507 p.
8. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur*: monogr [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
9. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
10. Kostyuk, G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2009. 406 p.
11. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2007. 633 p.

Поступила (received) 15.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Створення високоентропійних нітридних нанопокриттів на твердому сплаві Т12А / Г.І. Костюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 14–18. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Создание высокоэнтропийных нитридных нанопокрытий на твёрдом сплаве Т12А / Г.И. Костюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 14–18. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Creation of highly entropic nitride nanocoats on a solid T12A alloy / G. Kostyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P14–18. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Генадій Ігорович **–** доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Костюк Геннадий Игоревич – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich **–** Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovsky, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

УДК 621.879

В.Д. КОВАЛЬОВ, Я.В. ВАСИЛЬЧЕНКО, В.С. АНТОНЮК, О.І. ВОЛОШИН, С.В. РЯБЧЕНКО

ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМКИ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКІСНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ КРУПНОГОАБАРИТНИХ РЕДУКТОРІВ

Плідність роботи полягає в тому, що результати по забезпеченню якісного виготовлення крупногоабарітних редукторів знаходяться на рівні світових аналогів. Розроблені нові технологічні напрямки в виготовленні крупногабаритних редукторів з використанням нових вид зубчастих зачеплень з гарантованим рідинним змащуванням зони контакту, нові інноваційні технології виготовлення зубчастих коліс з гідродинамічними карманами для утворення рідинного режиму змащування в зоні контакту. Внаслідок цього забезпечується зниження коефіцієнта тертя, контакт здійснюється через мастильний шар рідини, яка знаходиться на момент утворення контакту в неньютоновському стані рідини завдяки гідрокарманам з утворенням пружно-нестислової мастильної рідини. Гідрокармани на евольвентній поверхні ведучого циліндричного зубчастого колеса зубчастої циліндричної передачі забезпечують високу несучу здатність конактуємих евольвентних поверхонь.

Ключові слова: замкова нарізь, різець, передній кут, кут підйому нарізі, половинний кут профілю отриманої нарізі, кут нахилу різальної кромки, статичний передній кут з нульовим значенням.

Изготовление конических замковых резьбы происходит с помощью резцов с нулевым значением переднего статического угла в вершинной точке и тем самым уменьшаются технологические возможности, по увеличению технологической стойкости инструмента в условиях обработки труднообрабатываемых материалов из которых часто изготавливают буровые замки. В статье предложен алгоритм и программное приложение на основе него, которое позволяет провести анализ влияния переднего угла и угла подъема резьбы на величины отклонений половинных углов профиля полученной резьбы. Получены выводы, которые свидетельствуют о возможности применения указанного приложения в подготовке и проведении дальнейших исследований влияния точности установки инструмента, его геометрических параметров и технологических факторов процесса на точность полученного профиля замковой резьбы.

Ключевые слова: важке машинобудування, інноваційні технології, великогабаритні редуктора, новий вид зубчастих зачеплень, демпфірування, пульсації навантаження, підвищення якості, точність, продуктивність.

The article describes the results of the work to ensure the quality production of large-size gearboxes. Based on the use of modern technology in machine building and the generalization of scientific achievements in the gearshift of hardened coarse-grained cogwheels and the requirements for heavily loaded and critical gears, the general principles for the development of new innovative technologies and schemes for shaping gears using the modern capabilities of numerical software Management and development of new machine tools. This provides an improvement in the quality and accuracy of cogwheels up to 12 m in diameter, a module up to 65 mm and processing capacity 3-6 times. New technological directions for the manufacture of large-sized gearboxes using new types of gearing with guaranteed liquid lubrication of the contact zone, new innovative technologies for manufacturing gears with hydrodynamic pockets for the formation of a liquid lubrication regime in the contact zone have been developed. Hydrokams on the involute surface of the leading cylindrical gear wheel provide a high load-bearing capacity of the curable involute surfaces. Such gear cylindrical gears provide high damping of pulsating load of gears of large-sized reducers, allow to reduce a technological heredity of errors of processing of the interfaced surfaces of cogwheels and reducer housings.

Keywords: dragline Heavy engineering, innovative technologies, large-size reduction gears, a new kind of gearing, damping, pulsating load, improving quality, accuracy, productivity.

Постановка проблеми. Підвищення ефективності промислового виробництва в значній мірі пов'язане з розробкою й освоєнням гірничодобувного й переробного устаткування, транспортних, енергетичних систем, приводи яких містять крупногабаритні редуктори масою до 50т з крупномодульними зубчастими передачами ***(****m*=12...65мм***)***.

Ефективна експлуатація крупногабаритних редукторів **(**рис. 1**)** виробів важкого машинобудування прат НКМЗ в значній мірі залежить від контактної міцності зубчастих коліс, яка збільшується з підвищенням поверхневої твердості зубів.

Рис. 1 – Рудорозмельний млин з зубчастими передачами виготовлений по інноваційній технології

Несуча здатність зубчастих передач по контактній міцності збільшується з підвищенням поверхневої твердості зубів. Підвищення твердості поверхні зубів з HRC32 до HRC60 дозволяє вдвічі зменшити габарити редуктора і в 3 рази зменшити його масу [1-2].

Однак висока трудомісткість виготовлення загартованих крупномодульних зубчастих коліс обмежує їх застосування через значні припуски, які призначають на операціях зубошліфування для усунення дефектів після термообробки, можливість утворення припіків і мікротріщин, обмеження в розмірах зубчастих коліс, що установлюються на зубошліфувальних верстатах.

З іншого боку, висока ймовірність відмови в роботі крупномодульних незагартованих зубчастих коліс, для яких з технологічних причин неможливо виконати зубошліфування, при їх значних розмірах та масі значно підвищує витрати на їх виготовлення. В той же час підвищення твердості поверхні зубів з HRC32 до HRC60 дозволяє вдвічі зменшити габарити редуктора та в 3 рази зменшити масу [1-2].

Тому розробка технологічних основ забезпечення продуктивності, точності та якості обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс є актуальною проблемою важкого машинобудування [3].

Аналіз попередніх досліджень. Виготовити високоточні загартовані крупномодульні зубчасті коле-

© В.Д. Ковальов, Я.В. Васильченко, В.С. Антонюк, О.І. Волошин, С.В. Рябченко 2017

са, ступінь точності яких 6В...8В (ГОСТ1643-81), що працюють у широких діапазонах зміни швидкостей (від 0,5 до 30 м/с), потужностей (від 50 Квт до 500000 Квт), мають діаметри до 12000 мм, ширину зубчастого вінця до 1200 мм, модуль до m=65 мм, у багатьох випадках практично неможливо через відсутність технологічного устаткування, інструментального забезпечення, технологічних регламентів чистової зубообробки та недостатність досліджень з питань забезпечення якості поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс [3].

Мета роботи. Для обробки крупномодульних зубчастих коліс із високою зносостійкістю зубців, з високими властивостями міцності поверхневого шару доцільно дослідити технологічні напрямки остаточної обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс для забезпечення необхідних параметрів шорсткості поверхні, якості зубофрезерування з досягненням високої продуктивності.

Тому розробка технологічних основ забезпечення продуктивності, точності та якості зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчатих коліс є актуальною проблемою важкого машинобудування. На рис. 2 наведені приклади обробки зубчастих коліс крупногабаритних редукторів ПрАТ НКМЗ за інноваційними технологіями.

Виклад основного матеріалу. На основі використання сучасних положень технології машинобудування і узагальнення наукових досягнень в зубообробці загартованих крупномодульних зубчастих коліс і вимог до важконавантажених та відповідальних зубчастих передач вперше сформульовані і реалізовані загальні принципи розробки нових інноваційних технологій та схем формоутворення зубчастих коліс з використанням сучасних можливостей числового програмного керування та розробкою нового верстатного обладнання. Це забезпечує підвищення якості та точності зубчатих коліс діаметром до 12 м, модулем до 65 мм та продуктивності обробки в 3-6 раз.

Реалізація інноваційних технологій обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс виконується:

- на оброблювальному центрі з нарізанням зубців на вінцях зубчастих коліс діаметром до 12 м (суміщення технологічних операцій токарно-карусельної і зубофрезерної);
- на токарному оброблювальному центрі виконується нарізання зубців на вал-шестернях, в т.ч. і з закритими шевронами діаметром до 1500 мм і довжиною до 8 м, виконується нарізка витків глобоїдних і архімедівських черв'яків (суміщення технологічних операцій токарної і зубофрезерної);
- на розточувальному верстаті з ЧПК - виконується нарізання зубців черв'ячних глобоїдних і архімедівських коліс;
- на поздовжньо-фрезерному оброблювальному центрі (суміщення технологічних операцій токарної, зубофрезерної і будь-якої операції, що вимагає свердлильно-фрезерно-розточувальну групу обладнання);
- на зубошліфувальному верстаті виконується обробка деталей конічного зачеплення;
- на вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК - виконується нарізування зубців на колесах зубчастих діаметром до 5м.

Впровадження інноваційних технологій обробки крупномодульних зубчастих коліс дозволило вивести з експлуатації близько 15 одиниць застарілих верстатів.

Рис. 2 – Приклади обробки зубчастих коліс за інноваційними технологіями

Раніше традиційна технологія нарізування кругового зуба на НКМЗ виконувалася на верстатах Саратовського верстатозаводу лезовим інструментом виробництва НКМЗ - зуборізними головками з швидкорізальними різцями, що в кращому випадку забезпечувало восьму ступінь точності і шорсткість поверхні R_a=3,2мкм. У зв'язку з відсутністю можливості обробки таких зубців з високою твердістю (до 61 *HRC*) існувало обмеження з виготовлення конічних зубчастих передач зі зміцненим зубцями високої точності.

Нова технологія реалізована з використанням комплексу обладнання, що включає: фрезерно-токарний оброблювальний центр, зубошліфувальні верстати з ЧПК, контрольно-обкатний верстат з ЧПК; контрольно-вимірювальну машину з ЧПК, об'єднує всі етапи підготовки виробництва і безпосередньо етапи виготовлення конічних передач в наскрізний потік.

Це відображено в нормативних документах «Схема проектування, виготовлення, вимірювання, коригування та контролю готової продукції». Управління виробництвом деталей конічних зубчастих передач з криволінійним зубом на всіх етапах відбувається за системою EMS (Expert Manufacturing System). На кожному етапі всі процеси автоматизовані і виконуються за допомогою спеціального програмного забезпечення.

В одному з них конструктор створює математичну модель конічного зачеплення з виконанням аналізу міцності і необхідної плями контакту зчеплення, результатом якого є файл даних, який передається на фрезерно-токарний оброблюючий центр або на зубошліфувальні верстати.

Реалізація інноваційних технологій виконується на оброблювальний центрі «Heller», який призначений для виготовлення великих зубчастих коліс, діаметром до 1800 мм. Це - унікальний верстат, на якому можлива лезова обробка зубців після зміцнення, коли твердість поверхні зуба становить HRC 60. При цьому досягається фактично «шліфовувана» поверхня з шорсткістю R_a=1,25...1,6 мкм. Обробний центр «Heller» дозволяє вести обробку практично будь-якого типу конічного зубчастого зачеплення (наприклад, круговий або прямий зуб, палоїдне і цикло- палоїдне зачеплення, зачеплення Klingelnberg).

Розроблені технологічні засоби зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс, які неможливо було виконувати на існуючому обладнанні та розроблена перспективна технологічна схема швидкісного зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчатих коліс замість зубостругальної операції з забезпеченням якості поверхневого шару з урахуванням радіуса округлення різальної крайки інструменту, який збільшується протягом часу, що забезпечило підвищення ефективності швидкісного зубофрезерування зі зменшенням кута ковзання і збільшенням кута, на якому здійснюється зрізання поверхневого шару. Схеми впроваджених технологічних процесів зубообробки загартованих зубчатих коліс за інноваційними технологіями наведені в табл.1.

Впровадження зубошліфувального верстата «Phoenix» забезпечує якісні показники 4-5 ступені точності. Спеціалізація цього верстата - більш дрібні деталі діаметром до 800мм. Його унікальність в здатності шліфувати з «нуля», без попереднього формоутворення дорогими фрезами або різцевими головками за традиційною технологією.

Також впроваджено нові процеси шліфування крупномодульних зубчастих коліс на зубошліфувальних верстатах «Gleason-Pfauter». Для цих верстатів Інститутом надтвердих матеріалів спільно з абразивною фірмою ДП «БЕСТ-БІЗНЕС» розроблені та впроваджені спеціальні шліфувальні круги з хромтитаністого рубін–корунду форми Т2 (форма кільця) діаметром від 178 мм до 564 мм та висотою до 90 мм.

Перспективним інструментом для шліфування зубчастих коліс є високопористі абразивні круги з монокристалічного корунду для профільного шліфування на верстатах «Gleason-Pfauter».

Завершальним етапом роботи виготовлення зубчастих коліс для важкого машинобудування є контроль якості зубчастого колеса.

Готові деталі зубчастого зачеплення надходить на контрольно-вимірювальну машину з ЧПК де виконується контроль параметрів, наприклад, крок, похибки профілю, відхилення напряму лінії зуба, радіальне биття зубчастого вінця тощо.

Отже, готова деталь зубчастого зачеплення надходить на контрольно-вимірювальну машину з ЧПК. Конструктор створює еталон - спеціальний файл вимірювання, який по мережі передається на вимірювальну машину.

Машина виконує вимірювання бічної поверхні зубів, торкаючись її вимірювальним щупом. Потім спеціальне програмне забезпечення виконує порівняння результатів вимірювань з математичним еталоном деталі і видає величини відхилень. На даній машині можна виконати контроль декількох десятків параметрів, наприклад, крок, похибка профілю, відхилення напряму лінії зуба, радіальне биття зубчастого вінця тощо.

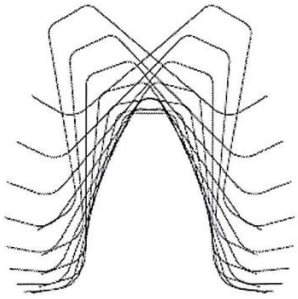
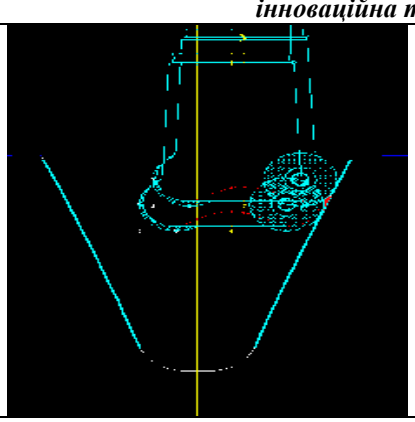
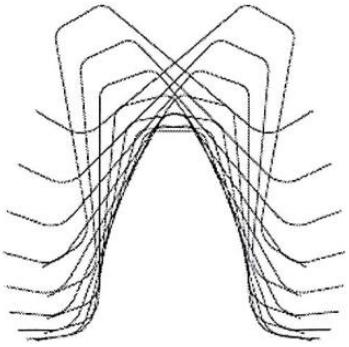
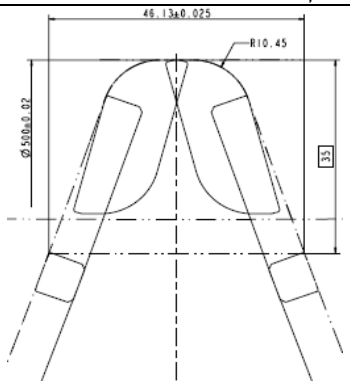
Похибки форми зуба впливають на пляму контакту - одну з найважливіших характеристик будь-якої зубчастої передачі. Перевірка плями контакту виконується на контрольно-обкатному верстаті при безпосередній установці на ньому двох деталей зубчастого зачеплення - шестерні і колеса. Система ЧПК об'єднана з виробничим програмним комплексом.

Основні переваги програмного забезпечення для контрольно-вимірювальних машин:

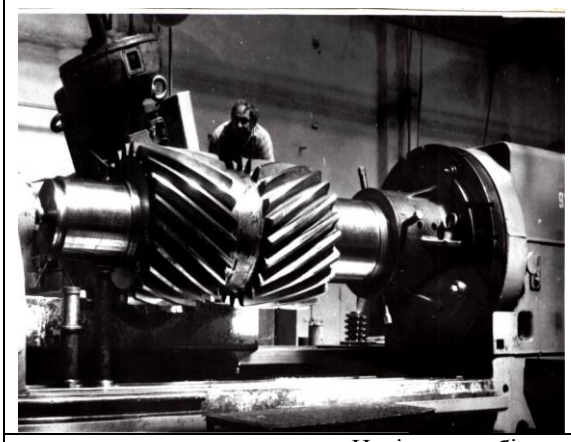
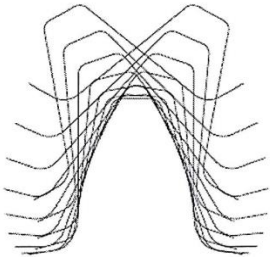
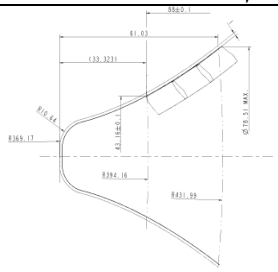
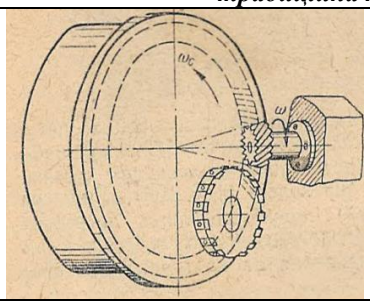
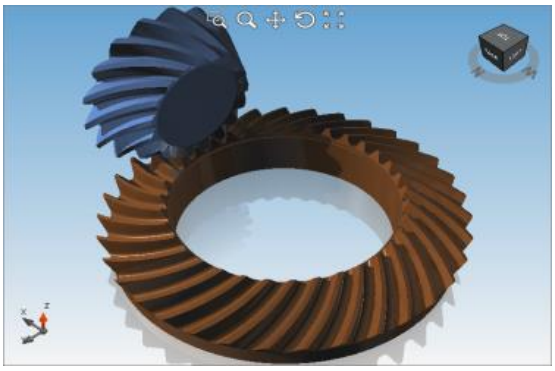
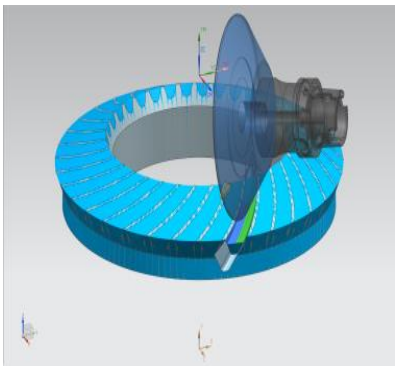
- контроль сполучення робочих поверхонь зуба для конічних шестерень забезпечує стабільне положення вимірюваної деталі;
- процес вимірювання від початку до кінця побудований у формі діалогу і максимально спрощений для оператора;
- результати контролю автоматично зберігаються на робочому місці, їх можна використовувати для коригування параметрів програми шліфувального верстата або передавати на заводський сервер;
- аналіз відповідності нормам або самостійно заданими допусками відбувається автоматично.

Таблиця 1

Схеми зубообробки загартованих зубчатих коліс за інноваційними технологіями

Нарізання зубів на вінці зубчастому з модулем 50мм.		
	традиційна технологія	
	Схема формоутворення западини зуба	*устаткування, різальний інструмент, трудомісткість роботи*
- Модуль 50мм; - Число зубів 168; - Зовнішній діаметр вінця 8490мм; - Ширина вінця 360мм; - Кут нахилу зуба 0 °; - Ступінь точності 9. 	 метод обкату	Зубостругальний верстат «Maag»; гребінки зі швидкорізальної сталі; 1250 ст. н. ч.
	інноваційна технологія	
		Портальний обробний центр «Waldrich Coburg – PowerTec» 7500 AG-S2; дискові та кінцеві фрези з ЗНП; 371 ст. н. ч.
Нарізання зубів на вінці зубчастому з модулем 28мм.		
	традиційна технологія	
	 метод обкату	Зубостругальний верстат «Maag»; гребінки зі швидкорізальної сталі; 1497 ст. н. ч.
- Модуль 28мм; - Число зубів 336; - Зовнішній діаметр вінця 9527,66мм; - Ширина вінця 900мм; - Кут нахилу зуба 6 °; - Ступінь точності 8.	***інноваційна технологія***	
	 метод копіювання	Портальний обробний центр «Waldrich Coburg – PowerTec» 7500 AG-S2»; дискові фрези з ЗНП; 179 ст. н. ч.

Продовження табл.1

<table>
<tr><td colspan="3">Нарізання зубів на вал-шестерні з модулем 28мм.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">- Модуль 28мм;
- Число зубів 28;
- Зовнішній діаметр вінця 863,98мм;
- Ширина вінця 920мм;
- Кут нахилу зуба 6 °;
- Ступінь точності 8.
  </td><td colspan="2">традиційна технологія</td></tr>
<tr><td> 
метод обкату
(Чистове обробка)</td><td>Зубофрезерний верстат для нарізання пальцьовими фрезами,
Пальцеві фрези зі швидкорізальної сталі, зубофрезерний верстат, черв’ячна фреза зі швидкорізальної сталі, 122,5 ст н. ч.</td></tr>
<tr><td colspan="2">інноваційна технологія</td></tr>
<tr><td> 
метод копіювання</td><td>Токарний обробний центр «Waldrich Siegen DHL» 1500x8000; пальцеві фрези з ЗНП; 32 ст. н. ч.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Нарізання зубів на колесі конічному з круговим зубом.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">- Модуль 10мм;
- Число зубів 35;
- Зовнішній діаметр колеса 505мм;
- Ширина вінця 99мм;
- Кут нахилу зуба 35 °, тип - кругової;
- Ступінь точності 8 - традиційна технологія;
- Ступінь точності 6 - інноваційна технологія.</td><td colspan="2">традиційна технологія</td></tr>
<tr><td>  </td><td>Зуборізний верстат для нарізання конічних коліс з круговим зубом; різцева голівка з різцями зі швидкорізальної сталі; 27 ст. н. ч.</td></tr>
<tr><td colspan="3">інноваційна технологія</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td><td>Поздовжньо-фрезерний обробний центр «GLEASON PFAUTER-HELLER - CT8000»; дискові фрези з ЗНП; 6,5 ст.н.ч. (Але це з обробкою до і після зміцнення зубців);</td></tr>
</table>

Впровадження зубошліфувального верстата «Phoenix» забезпечує якісні показники 4-5 ступені точності. Спеціалізація цього верстата - більш дрібні деталі діаметром до 800мм. Його унікальність в здатності шліфувати з «нуля», без попереднього формоутворення дорогими фрезами або різцевими головками за традиційною технологією.

Також впроваджено нові процеси шліфування крупномодульних зубчастих коліс на зубошліфувальних верстатах «Gleason-Pfauter». Для цих верстатів Інститутом надтвердих матеріалів спільно з абразивною фірмою ДП «БЕСТ-БІЗНЕС» розроблені та впроваджені спеціальні шліфувальні круги з хромтитаністого рубін–корунду форми Т2 (форма кільця) діаметром

від 178 мм до 564 мм та висотою до 90 мм.

Перспективним інструментом для шліфування зубчастих коліс є високопористі абразивні круги з монокристалічного корунду для профільного шліфування на верстатах «Gleason-Pfauter».

Завершальним етапом роботи виготовлення зубчастих коліс для важкого машинобудування є контроль якості зубчастого колеса.

Готові деталі зубчастого зачеплення надходить на контрольно-вимірювальну машину з ЧПК де виконується контроль параметрів, наприклад, крок, похибки профілю, відхилення напряму лінії зуба, радіальне биття зубчастого вінця тощо.

Отже, готова деталь зубчастого зачеплення надходить на контрольно-вимірювальну машину з ЧПК. Конструктор створює еталон - спеціальний файл вимірювання, який по мережі передається на вимірювальну машину.

Машина виконує вимірювання бічної поверхні зубів, торкаючись її вимірювальним щупом. Потім спеціальне програмне забезпечення виконує порівняння результатів вимірювань з математичним еталоном деталі і видає величини відхилень. На даній машині можна виконати контроль декількох десятків параметрів, наприклад, крок, похибка профілю, відхилення напряму лінії зуба, радіальне биття зубчастого вінця тощо.

Похибки форми зуба впливають на пляму контакту - одну з найважливіших характеристик будь-якої зубчастої передачі. Перевірка плями контакту виконується на контрольно-обкатному верстаті при безпосередній установці на ньому двох деталей зубчастого зачеплення - шестерні і колеса. Система ЧПК об'єднана з виробничим програмним комплексом.

Основні переваги програмного забезпечення для контрольно-вимірювальних машин:

- контроль сполучення робочих поверхонь зуба для конічних шестерень забезпечує стабільне положення вимірюваної деталі;
- процес вимірювання від початку до кінця побудований у формі діалогу і максимально спрощений для оператора;
- результати контролю автоматично зберігаються на робочому місці, їх можна використовувати для коригування параметрів програми шліфувального верстата або передавати на заводський сервер;
- аналіз відповідності нормам або самостійно заданими допусками відбувається автоматично.

Програма містить модуль, за допомогою якого можна розглядати циклограму випробувань цілком і автоматично розкладати її на дрібні цикли із заданою періодичністю, що, в свою чергу, дозволяє оцінити результати випробувань з мінімальною статистичною похибкою.

У програмі передбачений математичний фільтр, що збільшує або зменшує дозвіл при контролі топографії. Тут же можуть бути зафіксовані величини монтажних відстаней, на яких реалізована пляма контакту. Їх можна використовувати при складанні редуктора або механізму, в якому дана пара буде працювати.

Інноваційні технології мають такі відмінні риси у порівнянні з традиційними технологіями:

- замість швидкорізальних фрез, різців, гребінок використовуються високопродуктивні фрези з ЗНП або фрези, отримані методом порошкової металургії і мають зносостійкі покриття;
- істотно скорочується допоміжний час за рахунок об'єднання технологічних операцій при використанні обробних центрів;
- не потрібно виконувати розрахунок і установку спеціальних кінематичних ланцюгів верстата, так званих «гітар», тому що нарізка зубців ведеться по керуючим програмам;
- практично немає обмежень з максимально можливого оброблюваного модулю, тому що на верстатах з ЧПК і ОЦ використовуються стандартні різальні інструменти, а обробка поверхонь зубів виконується по керуючій програмі;
- підвищується якість оброблюваних деталей – досягається 5 ступінь точності і шорсткість *Ra* 1,6 мкм проти 8 ступеня точності і шорсткості *Ra* 3,2 мкм за традиційними технологіями.

Традиційний парк зубообробляючих верстатів дозволяв вести обробку в обмежених рамках - можливостей технологічної системи «верстат - різальний інструмент». Інноваційні ж технології виготовлення різних крупномодульних зубчастих передач для важкого машинобудування засновані на наскрізній системи «проектування - виробництво - вимір», що дозволяє на основі будь-яких необхідних видів зубчастих зачеплень і профілів, характеристик зачеплення і передачі в цілому розробити графічну модель передачі з її математичним описом в «CAD-CAM» системах з можливістю управління модифікаціями бічної поверхні зубів і плямою контакту в зачепленні [3]. За цими моделями розробляються технології і генеруються керуючі програми обробки на багатофункціональних обробних центрах з використанням універсального різального інструменту, з подальшим вимірюванням результатів обробки і при необхідності- коригування керуючих CNC-програм за результатами контролю.

Вперше визначений і математично описаний взаємозв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь крупномодульних загартованих зубчастих коліс з їх показниками якості, що дозволило вирішити основну технологічну проблему зубооброблення – забезпечення продуктивності, точності і якості крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані. Встановлені і науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки поверхневого стану крупномодульних загартованих зубчастих коліс після лезової обробки.

Розроблений механізм технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь зубців крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, на основі математичного структурно-параметричного моделювання процесу їх обробки. Сформульовано наукове положення по технологічному оснащенню для інтенсивної і високоякісної зубообробки.

Розроблені практичні рекомендації по вживанню технології швидкісного зубофрезеруванія з призначенням і забезпеченням параметрів поверхневого шару крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.

Наукова новизна роботи «Розробка, створення та впровадження інноваційних технологій виготовлення крупногабаритних редукторів для виробів важкого машинобудування» полягає в наступному:

– на основі широкого аналізу та узагальненню промислових досягнень в зубообробці загартованих крупномодульних зубчастих коліс, вимог до важконавантажених і відповідальних зубчастих передач вперше сформульовані і реалізовані принципи забезпечення високої продуктивності, точності та якості чистового зубофрезерування при оптимізації структури і параметрів технологічної дії та наукові основи підвищення вимог до розробки інструментального і технологічного оснащення при умовах обмежень на якість поверхневого шару зуба зубчастого колеса;

– вперше розроблені технологічні засоби зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс, які неможливо було виконати на існуючому обладнанні за рахунок відсутності можливості зубошліфування;

– розроблена нова технологічна схема швидкісного зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс з використанням нових технологічних рішень формування поверхневого шару з урахуванням ролі радіуса округлення різальної кромки інструменту;

– впровадженні дослідження по визначенню та математичному опису взаємозв'язків експлуатаційних властивостей поверхонь загартованих крупномодульних зубчастих коліс з показниками якості, що дозволило вирішити основну технологічну проблему зубофрезерування - забезпечення продуктивності, точності і якості зубообробки;

– запроваджено перспективний підхід до вибору методів обробки поверхонь зубців коліс на основі використання математичного апарату відповідностей, який базується на положеннях розрахунку вимог до поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс за допомогою графів, параметрів стану поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс залежно від умов обробки, ступеня впливу параметрів хвилястості на експлуатаційні властивості загартованих крупномодульних зубчастих коліс, керування якістю й продуктивністю формування при зубофрезеруванні;

– науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки стану поверхонь загартованих крупномодульних зубчастих коліс після лезової обробки, оцінки довговічності загартованих крупномодульних зубчастих коліс та мінімально можливих пластичних деформацій зубів загартованих крупномодульних зубчастих коліс;

– уперше розроблений механізм технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь зубців загартованих крупномодульних зубчастих коліс на основі математичного структурно-параметричного моделювання процесу обробки;

– застосування комплексного параметру стану зуба в умовах багатокритеріальної оптимізації двоступінчастого технологічного процесу обробки вперше дозволило науково обґрунтувати взаємозв'язок технологічного впливу на зуб колеса з параметрами якості зубчастого зачеплення крупномодульної циліндричної передачі;

– запропоновано математичний опис взаємозв'язків якісних і кількісних показників поверхневого шару зуба колеса й експериментально підтверджені загальні принципи керування параметрами точності, якості й продуктивності зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс;

– уперше розроблена імітаційна модель керування технологічним процесом фінішної лезової обробки зубців коліс на основі обмежень по якості й точності формованих зубців;

– сформульовано наукове положення по технологічному оснащенню для інтенсивної й високоякісної зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс.

Сформульована структурна постанова до формування поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс з забезпеченням основних напрямків підвищення продуктивності, точності і якості зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс на її основі.

Основними напрямками технологічного забезпечення продуктивності, параметрів стану поверхневого шару і якості зубообробки загартованих крупномодульніих зубчастих коліс є розробка й дослідження інноваційних технологічних методів формування поверхневого шару і альтернативних зубошліфуванню технологій.

При призначенні параметрів стану контактуючих поверхонь циліндричних КЗКЗ установлені можливості інноваційних технологічних методів обробки по забезпеченню параметрів поверхневого шару шорсткості *(R_{max}, R_a, R_z, R_p, S_m, S), хвилястості (W_a, W_p, Sm,)* і фізико-механічних властивостей поверхневого шару *($k=(H_{\mu 0}/H_{\mu})\cdot 100\%$, $h_{\mu 0}, \pm\sigma_0, h_{\sigma},$).*

На основі цих показників введено комплексний параметр стану поверхні, який характеризує певні експлуатаційні властивості через систему параметрів її якості й змінює свої значення в процесі припрацювання поверхонь, незалежно від вихідних значень, отриманих обробкою.

Процес зубофрезерування беззупинно вдосконалюється в напрямку підвищення продуктивності й точності обробки. Можливості підвищення продуктивності зубофрезерування визначаються аналізом формули основного технологічного (машинного) часу t_0.

На процес формування поверхневого шару суттєво впливає утворення хвилястості залежно від методів і режимів зубообробки. Висота хвилястості утвореної на евольвентній поверхні циліндричного зубчастого колеса при зубообробці визначається у відповідності з правилами підсумовування випадкових величин.

На основі оцінки взаємодії структурних процесів формування хвилястості поверхневого шару, отримані залежності знаходження параметричних показників.

Керування параметрами точності, якості й продуктивності зубообробки вирішено методами технологічного впливу з урахуванням кінематичних рухів зуборізного інструменту, залежності шорсткості поверхневого шару, який утворюється за рахунок постійних змін геометрії різальної частини інструмента, що необхідно обов’язково ураховувати при швидкісному зубофрезеруванні.

При організації серійного виробництва нових крупногабаритних редукторів удосконалювались існуючі та впроваджувались нові технології виготов-

лення деталей редукторів з високими експлуатаційними характеристиками, методи обробки зубчастих коліс і валів.

Розроблено нові види композиційних полікристалічних надтвердих матеріалів різного призначення для виготовлення високоефективного різального й шліфувального інструменту.

При обробці валів і осей редукторів використовували різальний інструмент з надтвердих матеріалів на основі щільних модифікацій нітриду бору, інструментальної кераміки та твердих сплавів із зміцнюючими покриттями на робочих поверхнях різального інструменту, що дозволило суттєво підвищити експлуатаційні характеристики і розширити технологічні можливості інструменту.

Для обробки валів редукторів з конструкційних сталей та сплавів розроблено нові види високоефективного різального інструменту та реалізовано технології чистової обробки валів і осей редукторів різанням та шліфуванням.

Найбільшою складністю при виготовленні валів великого діаметра (до 2000 мм) є забезпечення необхідної шорсткості циліндричної поверхні валів редукторів (Ra 0,04…0,02 мкм).

Технологічний процес виготовлення валів редукторів складається з декількох технологічних операцій. Перша операція - токарна обробка різцями з надтвердих інструментальних матеріалів або з твердого сплаву. Друга операція - кругле шліфування в центрах абразивним кругом з білого електрокорунду. Третя операція - фінішна обробка, як правило, тонке шліфування.

Якщо перша операція - токарна обробка мало визначає фінішну обробку великогабаритних валів, то друга операція - кругле шліфування - серйозно впливає на остаточну обробку.

Перспективним абразивним матеріалом для попереднього шліфування валів є спеціальний електрокорунд – хромтитаністий рубін-корунд [4]. Рубін-корунд дуже ефективний при шліфуванні спеціальних сталей, легованих металами - хромом, нікелем, кобальтом і т.д. Обробка цим абразивним матеріалом забезпечує ефективне подальше фінішне шліфування валів з шорсткістю поверхні вала редуктора (Ra 0,025 мкм).

В Інституті надтвердих матеріалів НАН України розроблений метод доводочного шліфування валів великого діаметра алмазними чашковими кругами. Шліфувальний круг встановлюють в положенні, щоб забезпечити площа контакту круга з валом рівну приблизно 200 мм^2.

Для шліфування валів використовували алмазні шліфувальні круги форми 12А2-45 діаметром 125 мм на зв'язці з поліефірної термостійкої смоли, які містять епігрупи, що дозволило підвищити зносостійкість інструменту.

Використання даного типу зв'язки поряд з досить великою площею контакту круга з виробом дало можливість вирішити питання, як зі зносостійкістю інструменту, так і з отриманням досить низькою шорсткості циліндричної поверхні.

Обробка виконувалась в три етапи зі зміною зернистості алмазного порошку від АС15 50/40 до АСМ 40/28.

В результаті на циліндричній поверхні валів редукторів була отримана шорсткість поверхні в межах *Ra* 0,025 мкм та забезпечена точність обробки валів, яка формується на другої операції обробки - шліфуванні.

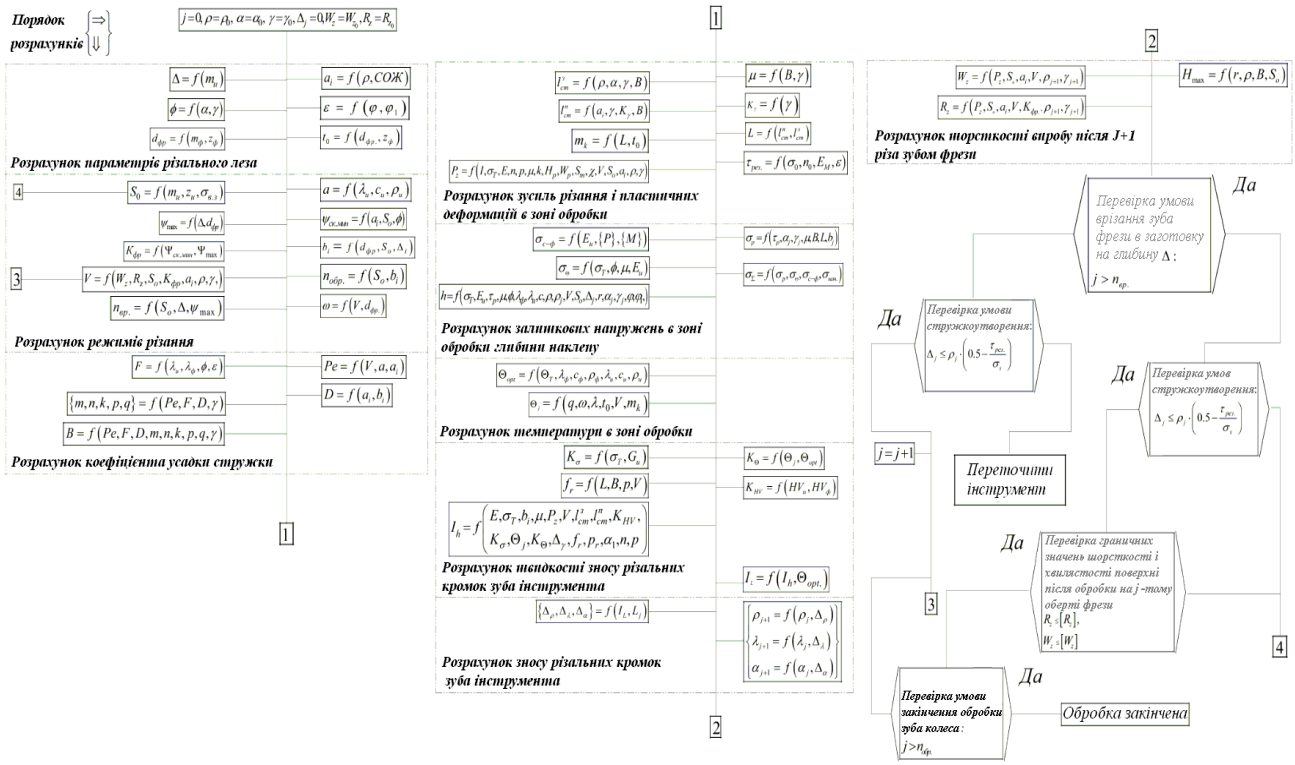


Рис.3 – Алгоритм розробки інноваційних технологій при багатокритеріальній оптимізації обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс

Однак, у виробництві крупногабаритних редукторів, як би не важливим було виробництво валів редукторів, основним е виробництво та методи обробки зубчастих коліс, тому що зубчасті колеса визначають експлуатаційні характеристики зубчастих редукторів [1, 5-6].

При виготовленні циліндричних зубчастих коліс, що працюють при високих знакозмінних навантаженнях в умовах високих контактних напружень, необхідно витримувати задані параметри якості поверхневого шару, зокрема шорсткість поверхні, глибину й ступінь наклепу, залишкові напруження.

На рис. 3 показано алгоритм розробки інноваційних технологій при багатокритеріальній оптимізації обробки загартованих крупномодульних зубчатих коліс.

У табл. 2 наведені методи зубообробки для забезпечення параметрів стану поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс.

Відзначено, що зі схем різання для дискових фрез, які оснащені мінералокерамікою (*III, IV*) найбільш ефективною є схема *IV*. Тут шлях обкату – найменший, але необхідно враховувати величину допоміжного часу, пов'язаного з перестановкою інструмента й підналагодженням заготовки колеса.

Схема *III* є другою за ефективністю. Недолік її полягає в тому, що через великий вихідний зсув інструменту щодо осі колеса на існуючих верстатах ВАТ “КЗТС” (м. Коломна) можлива обробка косозубих коліс тільки із зовнішнім діаметром до 800 мм.

Схема *IV* зручна в експлуатації, тому що не вимагає перестановки фрез.(Рис.4).

Для чистової обробки загартованих коліс на верстатах фірми “MAAG” розроблені дві конструкції спеціальних фрезерних супортів: одношпиндельна, яка реалізує схему *III*, і двошпиндельна, яка реалізує схему різання *IV* (рис.4)..

Розроблені інноваційні технології дозволяють підвищити продуктивність в 3-6 раз із забезпеченням якості та 5- го ступеню точності.

Раніше зубчасті колеса такого рівня закуповувались в Німеччині. Розроблені технології дозволили забезпечити імпортозаміщення, а також створення важких машин нового покоління (рудорозмельні млини, прокатні стани, енергетичне обладнання, поворотні платформи важких екскаваторів, важкі верстати тощо). Випуск таких виробів вітчизняного важкого машинобудування дозволив знайти нові експорті ринки та забезпечити створення нових робочих місць з високою інтелектуальною складовою.

Плідність роботи полягає в тому, що результати роботи знаходяться на рівні світових аналогів. Наприклад, вперше в світовій практиці розроблено новий вид зубчастих зачеплень з гарантованим рідинним змащуванням зони контакту.

Розроблені інноваційні технології можуть використовуватись в оборонній промисловості при виготовленні приводів важкої броньованої техніки з забезпеченням роботи на форсованих режимах.

Вперше у світовій практиці розроблені інноваційні технології виготовлення зубчастих коліс з гідродинамічними карманами для утворення рідинного режиму змащування в зоні контакту з використанням пружно-нестисливої рідини [5, 7].

Внаслідок цього забезпечується зниження коефіцієнта тертя, контакт здійснюється через мастильний шар рідини, яка знаходиться на момент утворення контакту в неньютоновському стані рідини завдяки гідрокарманам з утворенням пружно-нестислової мастильної рідини. Гідрокармани на евольвентній поверхні ведучого циліндричного зубчастого колеса зубчастої циліндричної передачі забезпечують високу несучу здатність конактуємих евольвентних поверхонь, малий коефіцієнт тертя в широкому діапазоні частот обертання.

Такі зубчасті циліндричні передачі забезпечують високе демпфування пульсаційного навантаження зубчастих коліс крупногабаритних редукторів виробів важкого машинобудування, дозволяють зменшення технологічного успадковування похибок обробки спряжених поверхонь зубчастих коліс та корпусів редукторів.

Таблиця 2

Можливості методів зубообробки в забезпеченні системи параметрів стану поверхневого шар загартованих циліндричних крупномодульних зубчастих коліс

Метод обробки	Параметри стану поверхневого шару								Фізико-механічні властивості поверхневого шару			
	Шорсткості					Хвилястості						
	R_a мкм	R_z мкм	R_p мкм	S_m мм	S мм	W_z мкм	W_m мкм	S_{mw} мм	$k=H_{\mu 0}/H_\mu$%	h_μ мм	σ_0 Мпа	h_σ мм
Зубофрезерування	4,5	60	50,0	0,5	0,1	8,0	5.0	2,5	120	0.2	250	0,1
	2,5	40	16	0,3	60		16	10,0	180	—	—	0,2
	0,9	20	4,0	—	—	25,0	0,63	0,8-4,0	110	0,5	300	0,08
Швидкісне зубофрезерування	1,9	16,	10,0	1,2	1,2	12.5	8,0	2,5	110	0,15	300	0. 015
	0,8	0	—	5	5-	—	40	12,0	180	—	—	—
	0,40		30	—	5,0	60,0	2,0	0,8	100	0,25	350	0,25
	0,20	50	2,5	5,0	0,3	3,0	12,5	8,0	150	0,08	200	0.10
Накатування конічними роликами	1,8	32	16,0	0,2	0,2	12,5	6,3	2,5	130	0,25	250	0,16
	0,8	—	—	0	0		25	15,0	190	—	—	—
	0,40	200	125	—	1,6	40,0	1,25	0,8	120	0,6	350	0.28
	0,20											

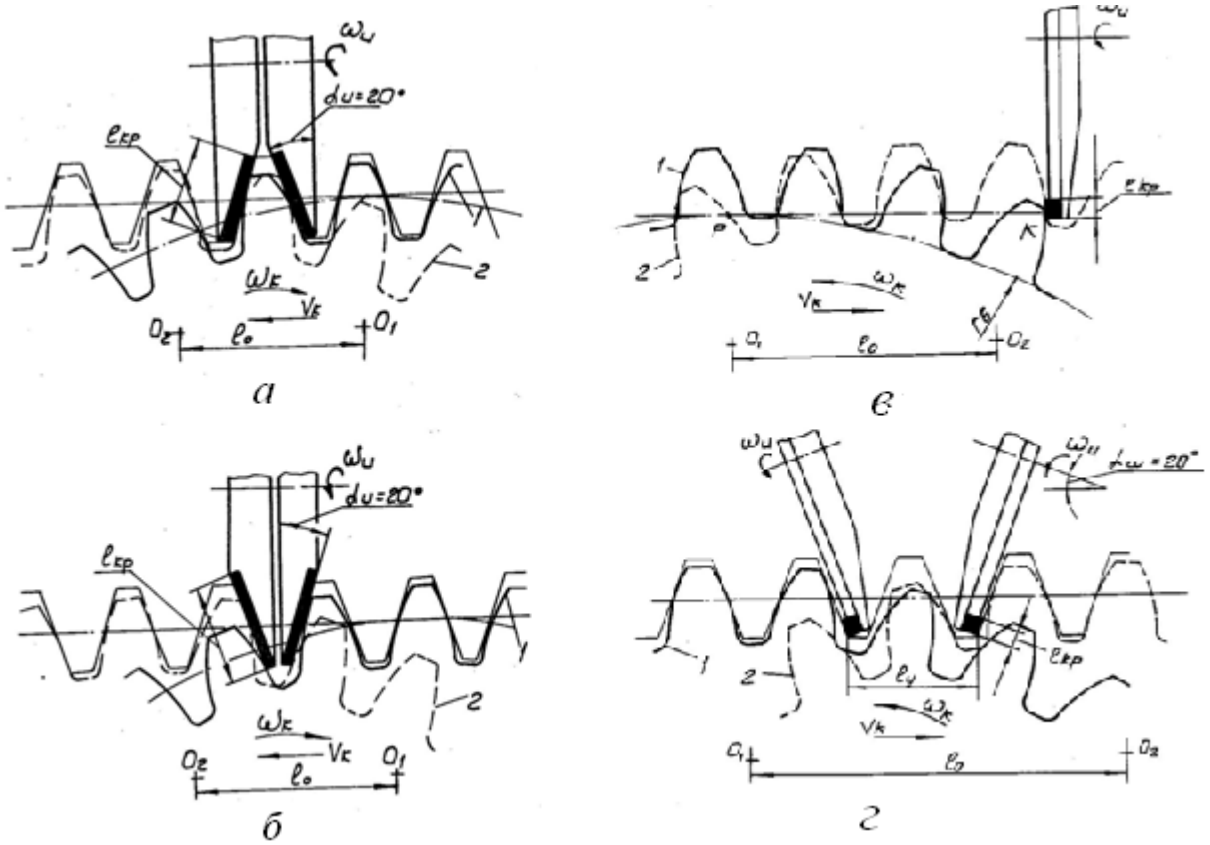


Рис. 4– Перспективні технологічні схеми швидкісного зубофрезерування дисковими немодульними фрезами: *а* - схема різання *I; б* - схема різання *II; в* - схема різання *III; г* - схема різання *IV*

Запропонована конструкція зубчастої циліндричної передачі з гідродинамічними карманами забезпечує високу несучу здатність циліндричних коліс, забезпечується підвищення кінематичної точності, плавності, бокового зазору.

Підвищення ефективності експлуатації важких редукторів забезпечується також розробленою технологічною схемою навантаження циліндричних коліс циліндричної передачі у якої кожний зуб шестерні контактує з кожним зубом зачіпляємого колеса, що забезпечує повну рівномірну приробітку всіх зубів. Раніше кожний зуб шестерні контактував тільки з одним , чи кілька зубами зачіплюваємого колеса, що негативно впливало на нестабільність роботи крупногабаритних редукторів, створювало підвищений шум та вібрації.

Використовуючи новітні технології по створенню, розробці та впровадженню інноваційних розробок по виготовленню крупномодульних зубчастих передач на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» виготовлюється продукція світового рівня з забезпеченням якості, точності та довговічності експлуатації машин (рис. 5, 6).

Практичне значення отриманих результатів для машинобудівельної галузі полягає в розроблені та виготовлені гами крупногабаритних редукторів для виробів важкого машинобудування, які за своїми технічними характеристиками знаходиться на рівні кращих закордонних аналогів *BEML, BUCYRUS, HEC, P&H, SENNEBOGEN, CNcrusher Us, Caterpillar* и др.

Рис. 5 – Важкий 3-осний редуктор з зубчастими передачами виготовлений по інноваційній технології

Рис. 6 – Важкий 6-осьовий редуктор з зубчастими передачами виготовлений за інноваційній технології

Висновки. Розроблені перспективні технологічні процеси швидкісного зубофрезерування із забезпеченням якості поверхневого шару й експлуатаційних характеристик загартованих крупномодульних зубчатих коліс. Запропоновано універсальну методику багатокритеріальної оптимізації параметрів стану поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчатих коліс в залежності від умов їхньої обробки, яка забезпечує експлуатаційні властивості крупно габаритних редукторів виробів важкого машинобудування.

Вперше в світовій практиці розроблено новий вид зубчастих зачеплень редукторів з гідродинамічними карманами і гарантованим рідинним змащуванням зони контакту з використанням пружно нестисливої рідини та некратним зачепленням зубчастих коліс.

Вирішена проблема спеціального технологічного оснащення та інструментального забезпечення високопродуктивної обробки загартованих крупномодульних зубчатих коліс та основних деталей редукторів на основі нових надтвердих матеріалів, інструментальної кераміки, зміцнюючих покриттів на інструментальних матеріалах а також оптимізації геометричних параметрів фрез для високоякісної зубообробки зубчастих коліс, яка суттєво підвищила продуктивність, якість та точність виготовлення, також технічні та експлуатаційні крупногабаритних редукторів. Для різальних швидкісних фрез з надтвердих матеріалів, інструментальної кераміки вперше отримане відносне співвідношення радіусу ріжучої округлення різальної кромки та товщини зрізувадьного шару при швидкісному зубофрезеруванні на основі основоположних теорій трибо техніки, технології машинобудування та теорії різання при формуванні поверхневого шару. Таким чином запропоновано науково обґрунтований підхід у формуванні необхідного радіуса округлення ріжучої кромки надтвердих змінних ріжучих пластин заданих параметрів та науково обґрунтованих режимів різання з забезпеченням найбільшої продуктивності і якості обробки загартованих зубчастих коліс.

Розроблено, створено та впроваджено інноваційні технології виготовлення крупногабаритних редукторів для виробів важкого машинобудування, що дозволило забезпечити імпортозаміщення, а також створити важке обладнання нового покоління (прокатні стани, поворотні платформи важких екскаваторів, рудорозмельні млини, важкі верстати тощо) енергетичної, гірничої та оборонної галузей промисловості.

Вперше в світовій практиці розроблено новий вид зубчастих зачеплень редукторів з гідродинамічними карманами і гарантованим рідинним змащуванням зони контакту з використанням пружно нестисливої рідини та некратним зачепленням зубчастих коліс.. Розроблені інноваційні технології можуть використовуватись в оборонній промисловості при виготовленні приводів важкої броньованої техніки з забезпеченням роботи на форсованих режимах.

Список литературы

1. Специальные технологи зубообработки крупномодульных закаленных колес : монография / Ю. В. Тимофеев, В. Ф. Шаповалов, А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск: ДГМА, 2011. – 128 с. ISBN 978-966-379-524-9.
2. *Шелковой А.* Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства /А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720.
3. *Добротворский С.С.* Перспективы применения передовых технологий в зубообработке конических колес с круговыми зубьями / С.С. Добротворский, А.А. Клочко, Е.В. Басова и др. // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2016. – №2 (12) – С. 10-14
4. Рябченко С.В. Обработка шлифованием зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ / С.В. Рябченко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Житомир : ЖДТУ, 2013. – Вип. 14. – С. 145–154.
5. *Клочко А.А.* Применение высокоскоростных тяжелонагруженных зубчатых цилиндрических передач / А.А.Клочко // Научный Вестник ДГМА. – 2014. – № 2 (14Е). – С. 42–55. Режим доступу *http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2(14E)_2014/nomer_2(14E)_2014.html*
6. Исследование гидродинамических свойств высокоскоростных тяжелонагруженных зубчатых цилиндрических передач тяжелых токарных станков / В. Д. Ковалев., А. А. Клочко, Д. А. Кравченко, Е. Н. Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 79–93.
7. Логіко-лінгвістичне моделювання взаємозв'язку функціональних характеристик системи дрібносерійного виробництва з параметрами процесу складання / О.М. Шелковий, О.О. Клочко, Л.Б. Шрон, А.О. Скоркін, О.Л. Кондратюк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. – Вып.67. – С. 94-100.

References (transliterated)

1. . *Timofeev Yu. V., Shapovalov VF, Klochko AA* [et al.] Special technologies for gear-cutting of coarse-grained hardened wheels: monograph. - Kramatorsk: DGMA, 2011. 28 p. ISBN 978-966-379-524-9.
2. . *Shelkova A., Klochko A., Naboka E.* Simulation modeling in the problems of mehanoscopic production - Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 528 p .: ill. In Russian. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN: 9783659691720.
3. *Dobrotvorskyy S.S., Klochko A.A. Basova E.V., ets*. Perspektivyi primeneniya peredovyih tehnologiy v zuboobrabotke konicheskih koles s krugovyimi zubyami [Prospects for the use of high-end technologies in the processing of bevel gears with circular teeth] *Matematicheskoe modelirovanie i programmnoe obespechenie proizvodstvennyih protsessov*. Magnitogorsk. 2016. No2(12). Pp 10-14.
4. *Ryabchenko S.V.* Grinding treatment of cogwheels with disk circles from STM. Processes of mechanical parts in machine-building machines: zb. Sciences. Prac. - Zhitomir: ZHDTU, 2013. - Vip. 14. - pp. 145-154.
5. *AA Klochko* Application of high-speed heavy-duty gear-type cylindrical gears. Scientific Bulletin of the DSEA. - 2014. - No. 2 (14E). - pp. 42-55. The access mode is http: //www.dgma.donetsk. Ua / science_public / science_vesnik / №2 (14E) _2014 / nomer_2 (14E) _2014.html
6. *Kovalev VD, Klochko AA, Kravchenko D. A ,. Kireev E.N.* Investigation of hydrodynamic properties of high-speed heavy-duty gear cylindrical gears of heavy lathes. Instrument reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 31. - pp. 79-93.
7. *SilkWood, KlochkoO.O. , Shron LB, Skorkin, A.O.* Kondratyu-kO.L. Logico-lingvistichnee modulyuvannya vzaimozvzyuku funktsio-nalnyh characteristics of the system of the other-virus vibrobnitsva with the parameters of the storage process. Open information and computer integrated technologies: Sat. Sci. Tr. - H.: Nats. Aerospace. Univ., "KhAI", 2015. - Issue 67. - pp. 94-100.

Поступила (received) 26.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технологічні напрямки щодо забезпечення якісного виготовлення крупногоабарітних редукторів / В.Д. Ковальов, Я.В. Васильченко, В.С. Антонюк, О.І. Волошин, С.В. Рябченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 19–30. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Технологические направления по обеспечению качественного изготовления крупногоабаритных редукторов / В.Д. Ковалев, Я.В. Васильченко, В.С. Антонюк, А.И. Волошин, С.В. Рябченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 19–30. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0023.

Technological directions for providing high-quality production of large-size reducers / V. Kovalev, Ya. Vasilchenko, V. Antonyuk, A. Voloshin, S. Ryabchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26(1248). – P. 19–30. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковальов Віктор Дмитрович – д.т.н, проф. ректор Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ.

Ковалев Виктор Дмитриевич – д.т.н, проф. ректор Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск.

Kovalev Viktor Dmitrievich - Doctor of Technical Sciences, prof. Rector of the Donbass State Machine-Building Academy, Kramatorsk.

Васильченко Яна Василівна – д.т.н,, доцент, в.о. завідувача кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ.

Васильченко Яна Василевна – д.т.н,, доцент, и.о. заведующего кафедры компьютеризированных мехатронных систем, инструмент и технологии Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск.

Vasilchenko Yana Vasilevna - doctor of technical sciences, associate professor, acting. Head of the Department of Computerized Mechanized Systems, Instrument and Technology of the Donbass State Machine-Building Academy, Kramatorsk.

Антонюк Віктор Степанович – д.т.н, проф. кафедри виробництва приладів, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ.

Антонюк Виктор Степанович - д.т.н., проф. кафедры производства приборов, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев.

Antonyuk Victor Stepanovich - doctor of technical sciences, prof. Department of Instrument Manufacturing, National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kyiv.

Волошин Олексій Іванович – головний інженер, Приватне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод», Краматорськ.

Волошин Алексей Иванович - главный инженер, Частное акционерное общество «Новокраматорский машиностроительный завод», Краматорск.

Voloshin Alexey Ivanovich - Chief Engineer, Private Joint-Stock Company "Novokramatorsk machine-building factory", Kramatorsk.

Рябченко Сергій Васильович – к.т.н., старший науковий співробітник відділу № 6, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ.

Рябченко Сергей Васильевич - к.т.н., старший научный сотрудник отдела № 6, Институт сверхтвердых материалов им. В.М. Бакуля НАН Украины, Киев.

Ryabchenko Sergey Vasilievich - Candidate of Technical Sciences, Senior Research Officer, Department number 6, Institute of Superhard Materials. VM Bakul NAS of Ukraine, Kiev.

УДК 621.992.04

Н. С. РАВСЬКА, В. В. ВОВК, С. П. ВОРОБЙОВ, Є.В. БАСОВА

ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІЗЦІВ ГОЛОВКИ ПРИ НАРІЗАННІ ТОЧНИХ АРОЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Розроблена методика визначення геометричних параметрів різцевої головки при нарізанні точних циліндричних арочних зубчастих коліс на верстатах з числовим програмним керуванням. Отримані залежності для розрахунку та аналізу передніх та задніх кутів інструменту в процесі нарізання та вздовж його різальних кромок. Запропоновано конструктивне забезпечення доцільних кутів на різальних кромках..

Ключові слова: геометричні параметри, різцева головка, зубонарізання, точні, арочні, зубчасті колеса.

Разработана методика определения геометрических параметров резцовой головки при нарезании точных цилиндрических арочных зубчатых колес на станках с числовым программным управлением. Получены зависимости для расчета и анализа передних и задних углов инструмента в процессе резания и вдоль его режущих кромок. Предложено конструктивное обеспечение целесообразных углов на режущих кромках.

Ключевые слова: геометрические параметры, резцовая головка, зубонарезание, точные, арочные, зубчатые колеса.

The use of precise cylindrical arched gears in machine mechanisms will increase their performance due to increased load capacity, wear resistance, noise reduction, vibration, increased durability. Cutting of such arched wheels can be carried out by with face cutters heads on machines with numerical control. With additional shaping movements, for cutting precise involute gear wheels, the geometry of the cutting element in the cutting process will differ from the original tool set in the drawing. Depending on the parameters of the gear and the cutter head value kinematic angles may acquire unsatisfactory value and adversely affect the gear cutting process. Therefore, the study and determination of the geometry of the tool blade during the cutting process is a topical problem that needs to be solved.

To solve this problem, a technique was developed to analytically determine the front and rear angles of a tool shaped blade. Depending obtained can determine kinematic angles along the cutting blades and at different positions of the tool and the workpiece.

Studies have shown that when cutting arched wheels with bilateral cutters that simultaneously cut the convex and concave sides of the tooth cavity, it is quite difficult and sometimes impossible to obtain satisfactory kinematic rear corners at the tip of the tool. Therefore, a scheme was proposed for separate cutting of the convex and concave sides of the tooth cavity, which makes it possible to apply angular occlusion, in which it is possible to obtain the necessary kinematic rear corners on the lateral and apical cutting edges of the tool.

Keywords: geometric parameters, tool head, gear cutting, precise, arched, wheels.

Вступ. Застосування циліндричних арочних зубчастих коліс на заміну прямозубих дає можливість збільшити навантажувальну здатність в 1,25–1,5 рази та довговічність у 2–3 рази, знизити вібрацію, шумові характеристики, металоємність та собівартість [1, 2]. Крім того, в арочних колесах легко досягається необхідна локалізація плями контакту, що знижує їх чутливість до перекосу осей, похибок монтажу [3, 4]. Вони забезпечують плавну передачу руху і можуть використовуватись як у тихохідних так і в швидкісних високонавантажених передачах [5,6].

Характерним для арочних зубчастих коліс, як і для косозубих, є наявність кута нахилу лінії зуба, який в свою чергу залежить від радіуса кривизни арки зуба і впливає на коефіцієнт осьового перекриття [7]. Проте на відміну від косозубих, в арочних передачах відсутні осьові зусилля, оскільки вони компенсуються протилежними кутами нахилу напіварок зуба, як і у шевронних зубчастих колесах, тому арочні зубчасті колеса можуть самовстановлюватись під навантаженням, якщо одному з них надати можливість осьового переміщення. Ця властивість особливо актуальна для високонавантажених передач. Так використання арочних зубчастих коліс в коробках швидкостей повітряних турбін дозволить підвищити їх надійність та довговічність [8].

Також застосування арочних зубчастих коліс в роторах гідравлічних шестеренних насосів дозволяє зменшити віброшумову характеристику насосів, отримати порівняно більший коефіцієнт перекриття зубів, в порівнянні з прямозубими, забезпечити локалізацію зони контакту зубів, що компенсує похибки напрямку зубів і відносного розташування осей роторів, зменшити пульсацію перекачуваної рідини [9].

Однак, не зважаючи на всі переваги циліндричних арочних зубчастих коліс, широкого розповсюдження у галузях промисловості вони не знайшли. Основною причиною цього, до недавнього часу, була відсутність способів їх зубонарізання, які б поєднували у собі такі характеристики, як технологічність, працездатність, простота, універсальність, точність, з яких більша кількість залишаються малодослідженими.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Класифікація способів зубонарізання та характеристики отримуваних зубчастих коліс показана у роботах [10, 11]. Автор розділяє існуючі способи зубообробки на два типи: способи, що дозволяють отримати зубчасті колеса зі змінним кутом тиску в поперечних перерізах зубчастого колеса та способи, що дають змогу отримати постійний кут тиску.

На даний час особлива увага приділяється циліндричним арочним колесам, що мають постійний контакт вздовж лінії зуба та незмінний кут тиску. Як показують дослідження, проведені у роботах [12, 13], саме такі зубчасті колеса характеризуються високою навантажувальною здатністю та можливістю самовстановлюватись під навантаженням. Нарізання таких зубчастих коліс здійснюється інструментом з нульовим та ненульовим кутом профілю.

Перші з них виконуються кінцевою фрезою [14, 15] або різцевою головкою [16] на верстатах з ЧПК. Вони характеризуються невисокою працездатністю, оскільки нарізання випуклої та ввігнутої частин западини зуба колеса здійснюється окремо, та

© Н. С. Равська, В. В. Вовк, С. П. Воробйов, Є.В. Басова, 2017

обмеженням на розміри інструменту, що нарізає западину зуба колеса.

Методи, що виконуються зуборізним інструментом з ненульовим кутом профілю, характеризуються більш високою продуктивністю, оскільки нарізання здійснюється одночасно випуклої та ввігнутої частин западини зуба колеса. Характерним для цих способів є формоутворення евольвенти в усіх торцевих перерізах та постійної товщини зуба колеса вздовж лінії зуба, шляхом збереження вихідного положення різальної частини інструменту при його русі по дузі кола або по іншій кривій лінії зуба. Це може досягатися за рахунок повороту різця навколо своєї осі в протилежному напрямку обертання різальної головки або наданням різцю коливального, паралельному собі, дугоподібного руху в площині, дотичній до ділильного кола шестерні [10]. У першому випадку, такий рух різця можна здійснити за рахунок різцевої головки у вигляді планетарного механізму [17], де різці встановлюються на сателітах, а водило є нерухомим. Проте даний механізм є досить складним і не універсальним, оскільки для нарізання зубів, виконаних по дузі кола, необхідне виготовлення відповідного радіуса різцевої головки. У другому випадку, автором [10] розглядається застосування верстата, що зможе забезпечити відповідні стругальні рухи при нарізанні циліндричних арочних зубчастих коліс. Однак, у роботі [18] показано, що незмінний рух різця можна забезпечити не лише планетарним механізмом та виготовленням стругального верстату, а за рахунок додаткових зміщень зубчастого колеса при нарізанні різцевими головками на пятикоординатних верстатах з числовим програмним керуванням.

В свою чергу, при способах зубонарізання розглянутих вище, коли різець не змінює свого положення відносно торцевого перерізу колеса, геометрія різальної частини буде змінюватись в процесі різання. Для забезпечення працездатності різального інструменту необхідно створити на різальній кромці величини геометричних параметрів, рекомендовані для оброблення даного матеріалу. Тому для оцінки величин цих кутів та прогнозування працездатного такого інструменту, що нарізає зуби циліндричного арочного зубчастого колеса при незмінному положенні його різального леза відносно торцевого перерізу колеса, необхідно розробити методику їх визначення, що є актуальною науковою та практикною задачею при проектуванні таких зуборізних інструментів.

Метою роботи є розробка методики визначення геометричних параметрів різців головки при нарізанні точних арочних зубчастих коліс на верстатах з числовим програмним керуванням та конструктивне забезпечення їх доцільних значень.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

– розробити методику визначення геометричних параметрів різальної частини інструменту в процесі нарізання циліндричних арочних зубчастих коліс;

– визначити зміну геометричних параметрів в процесі нарізання коліс вздовж різальної кромки;

– конструктивно забезпечити доцільні значення параметрів різців при нарізанні арочних зубчастих коліс.

Методика визначення геометричних параметрів різцевих головок при нарізанні точних арочних зубчастих коліс. Згідно ДСТУ 22498-93 регламентуються інструментальна, статична та кінематична системи координат, в яких визначаються відповідні геометричні параметри.

Визначення кутів в кінематичній системі координат, орієнтованій відносно результуючого руху, в найбільшій мірі відповідає процесу різання. Загальна методика їх визначення наведена у роботі [19]. Згідно цієї методики кінематичні передні $\gamma_{нк}$ та задні $\alpha_{нк}$ кути в нормальному до різальної кромки визначаються через інструментальні нормальні передні $\gamma_н$ та задні $\alpha_н$ кути та кутом $\tau_п$ між кінематичною $P_{пк}$ та інструментальною $P_{пі}$ площинами різання.

Значення нормальних кутів $\gamma_н$ та $\alpha_н$ вважаються заданими на вершинній кромці інструмента, а на бокових різальних кромках їх значення є невідомим. Тому виникає задача їх визначення.

Геометричні параметри різальної частини інструменту в інструментальній системі координат на бокових різальних кромках. Геометрія різальної частини торцевої головки для нарізання циліндричних арочних зубчатих коліс фасонним різцем в інструментальній системі координат $x_iy_iz_i$ зображена на рис. 1.

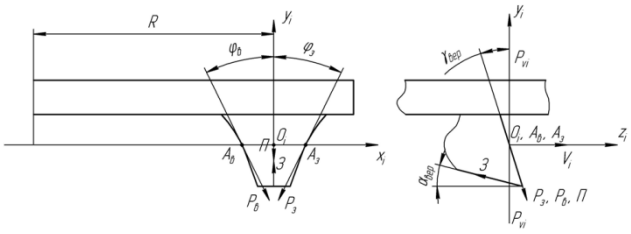


Рис. 1 - Геометрія різальної частини інструменту

Положення інструментальної системи координат $x_iy_iz_i$ вибираємо таким чином, щоб її початок (т. O_i) знаходився на осі симетрії зуба, точки внутрішньої $A_В$ та зовнішньої $A_З$ різальних кромок, через які проходить вісь x_i, лежали на ділильному колі зубчастого колеса, координатна площина x_iy_i лежала в інструментальній основній площині P_{vi}, а координатна площина x_iz_i проходила через точки $A_В$ та $A_З$.

Розглянемо інструментальні геометричні параметри різальної кромки різця:

$\gamma_{вер}$ та $\alpha_{вер}$ – вершинні передній кут та задній кут, які визначені у ДСТУ 22498-93.

Кутами в плані $\varphi_з$ зовнішньої та $\varphi_в$ внутрішньої бокових різальних кромок для евольвентної частини профілю при радіальній подачі буде кут між дотичною до евольвенти та напрямком подачі і визначається за формулою:

$$\varphi = \varphi_x + \varphi_0 , \quad (1)$$

де φ_x – кут розгорнутості евольвенти у досліджуваній точці;

φ_0 – кут повороту евольвентного профілю, між віссю симетрії западини зуба та початковою точкою евольвенти на основному колі.

При проектуванні фрез з кутами $\gamma_{вер}$= 0, коли передня площина проходить через вісь фрези, форма різальної кромки і профіль зуба фрези в осьовому пе-

рерізі будуть тотожні профілю вихідної інструментальної поверхні. В інших випадках профіль зуба фрези необхідно профілювати.

Для визначення інструментальних кутів на бокових різальних кромках необхідно визначити взаємне розташування передньої площини, задньої площини та площини різання в розглядуваній точці бокових різальних кромок.

Положення передньої площини визначається векторами дотичними до зовнішньої $P_з$ та внутрішньої $P_в$ бокових різальних кромок та вектором П, що лежить на лінії перетину передньої площини з координатною площиною y_iz_i. Довжину векторів $P_з$ та $P_в$ вибираємо такою, щоб їх проекція на інструментальну площину P_{vi} дорівнювала одиниці, а проекція вектора П на вісь y_i також була рівна одиниці. Тоді вектори можна записати так:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{P_з} &= -\vec{i}\sin\varphi_з - \vec{j}\cos\varphi_з + \vec{k}\cos\varphi_з \tan\gamma_{вер} \\ \overrightarrow{P_в} &= \vec{i}\sin\varphi_в - \vec{j}\cos\varphi_в + \vec{k}\cos\varphi_в \tan\gamma_{вер} \\ \overrightarrow{П} &= -\cos\gamma_{вер} + \vec{k}\sin\gamma_{вер} \end{aligned}, \qquad (2)$$

Положення задніх бокових площини визначається векторами $P_з$ та $P_в$ і вектором З, розташованим на задній поверхні вершинної різальної кромки. Довжину вектора З вибираємо такою, щоб його проекція на вісь y_i дорівнювала одиниці, тоді запишемо:

$$\vec{З} = \vec{j} - \frac{\vec{k}}{\tan\alpha_{вер}}. \qquad (3)$$

Вектор швидкості V_i в інструментальній системі координат перпендикулярний до основної площини P_{vi} і направлений вздовж осі z_i і його проекція на цю вісь дорівнює одиниці, тому:

$$\overrightarrow{V_i} = \vec{k}. \qquad (4)$$

Шляхом знаходження нормалей до передньої, задньої та поверхні різання за методикою [19] визначаються нормальні інструментальні передні $\gamma_{нб}$ та задні $\alpha_{нб}$ кути на бокових різальних кромках.

Для знаходження кута τ_n між кінематичною $P_{nк}$ та інструментальною P_{ni} площинами різання необхідно визначити положення векторів $P_з$ та $P_в$ дотичних до бокових різальних кромок в будь-який момент повороту різцевої головки та вектора швидкості V_e результуючого руху різання, як суму всіх рухів, що здійснює інструмент відносно заготовки.

Визначення швидкості результуючого руху та положення різця в процесі нарізання. Для визначення положення поверхонь різця в процесі нарізання необхідно визначити положення інструментальної системи координат в залежності від кута повороту заготовки. Для цього розглянемо формоутворюючі рухи при нарізанні арочних зубчастих коліс торцевими різцевими головками з додатковим зміщенням заготовки [18] (рис. 2).

Зв'яжемо систему координат $x_1y_1z_1$ з заготовкою наступним чином: вісь z_1 направимо вздовж осі обертання зубчатого колеса, площина x_1z_1 лежатиме у середньому (вихідному) торцевому перерізі зубчатого колеса, площина z_1y_1 ділитиме западину зуба порівну і лежатиме відносно осі обертання різцевої головки на відстані R.

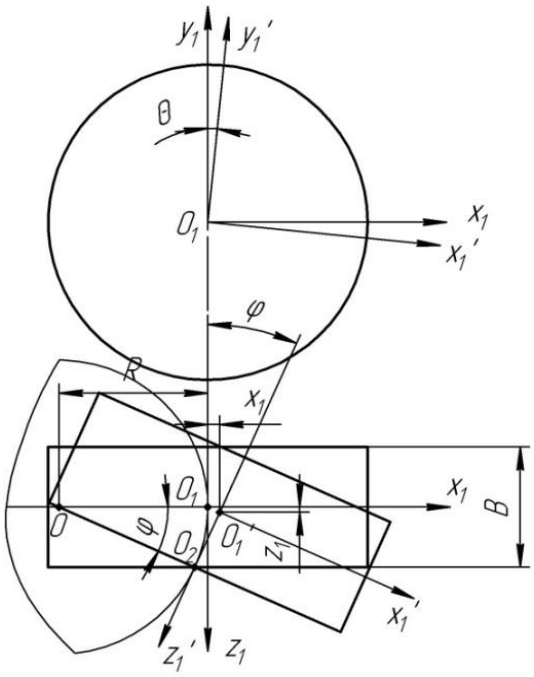


Рис. 2 - Схема формоутворення

В результаті повороту різцевої головки на кут φ, який визначено у роботі [18], система координат пов'язана з зубчатим колесом повернеться на кут φ навколо точки O_2 таким чином, що система координат заготовки займе нове положення, де її центр O_1' переміститься відносно початкового положення O_1 на величину x_1 та z_1.

Для утворення лінії зміщення вихідного контуру [16] необхідно, щоб заготовка повернулася навколо своєї осі обертання O_1Z_1 на кут θ, який визначається:

$$\theta = \frac{R - R\cos\varphi}{r}, \qquad (5)$$

де r – ділильний діаметр.

Наведений аналіз формоутворюючих рухів заготовки та різцевої головки дозволяють визначити положення інструментальної системи координат та площин різального леза у будь який момент повороту різцевої головки та переміщень заготовки. Для цього зупинимо заготовку, а всі формоутворюючі рухи надамо різцю торцевої головки (рис. 3). Введемо нерухому систему координат $x_0y_0z_0$ таким чином, що вісь y_0 співпадатиме з віссю обертання різцевої головки. Вісь x_0 співпадатиме з положенням осі заготовки x_0 у вихідному положенні (кут φ = 0), а площина x_0z_0 проходить через вісь обертання зубчастого колеса. Вісь z_0 буде лежати паралельно осі обертання зубчатого колеса z_1 у вихідному положенні при φ = 0 на відстані R.

При пороті різцевої головки на кут φ зубчасте колесо повернеться на кут θ (5). Відносний рух різець здійснює в осьовій площині різцевої головки навколо додаткової системи координат $x_2y_2z_2$, яка у середньому положенні при φ = 0 буде співпадати з інструментальною системою координат різального зуба.

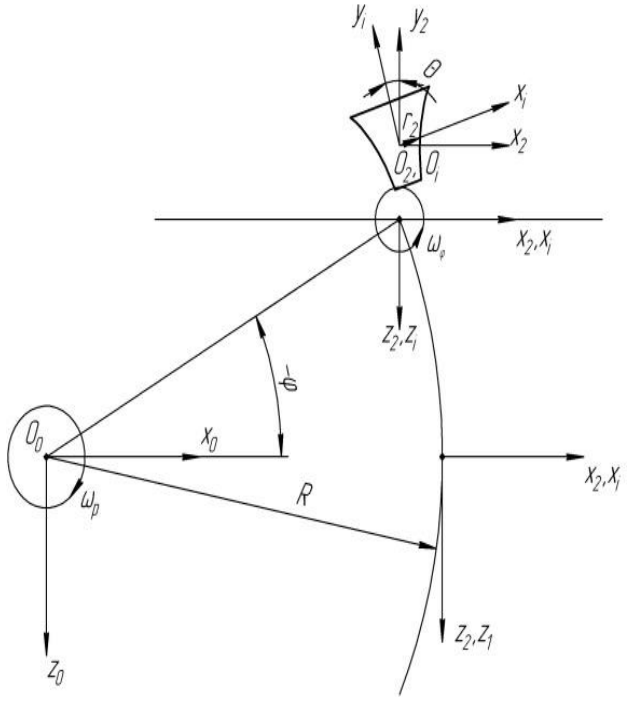


Рис. 3 - Відносний рух різця в нерухомій системі координат

Поворот різального зуба виконується навколо точки O_2, яка співпадає з точкою O_i інструментальної системи координат. Відповідно отримаємо формули переходу систем координат:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_i \cos\theta - y_i \sin\theta \\ y_2 &= y_i \cos\theta + x_i \sin\theta \\ z_2 &= z_i \end{aligned} . \qquad (6)$$

Окрім того при повороті різцевої головки система координат $x_2y_2z_2$, з якою пов'язана і система координат різця, повернеться на кут φ, відносно нерухомої системи координат $x_0y_0z_0$, таким чином, що вихідна інструментальна площина різця, завжди буде паралельною до середнього перерізу заготовки і відповідно отримаємо формули переходу систем координат:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_2 + R\cos\varphi \\ y_0 &= y_2 \\ z_0 &= R\sin\varphi + z_2 \end{aligned} . \qquad (7)$$

Підставляючи формули (24) в (25) отримаємо:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_i \cos\theta - y_i \sin\theta + R\cos\varphi \\ y_0 &= y_i \cos\theta + x_i \sin\theta \\ z_0 &= R\sin\varphi + z_i \end{aligned} . \qquad (8)$$

За формулами переходу знайдемо положення векторів дотичних до зовнішньої, внутрішньої та вершинної різальних кромок, в залежності від кута повороту різцевої головки.

Для знаходження результуючого вектора швидкості різального леза розглянемо усі формоутворюючі рухи, які здійснює різець та заготовка (рис. 4).

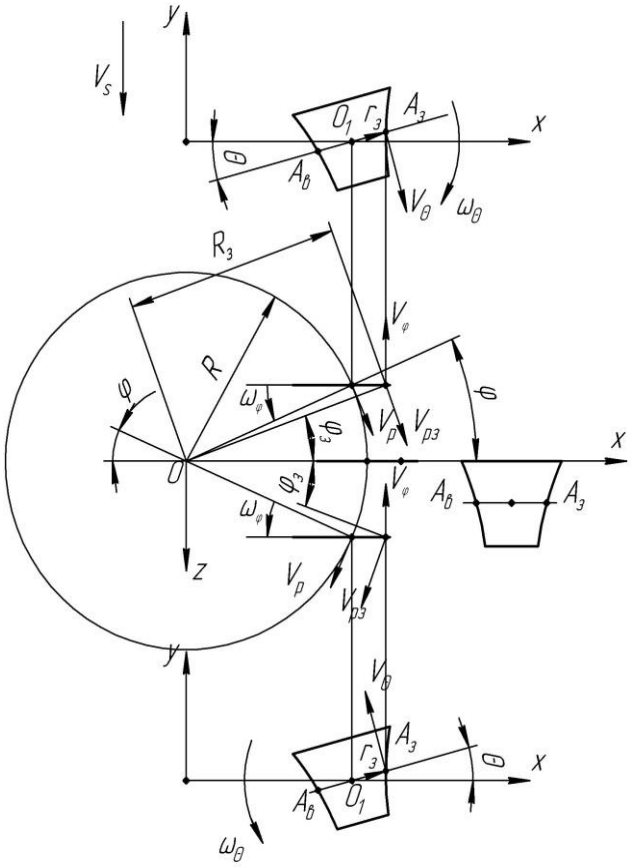


Рис. 4 - Відносні формоутворюючі рухи

Оскільки різець рухається по дузі кола радіуса R з кутовою швидкістю ω_p, то вектор швидкості різання в нерухомій системі координат точки $A_з$ зовнішньої різальної кромки буде дорівнювати:

$$\overrightarrow{V_{pз}} = \overrightarrow{\omega_p} \times \overrightarrow{R_з} = \vec{i}\left(-\omega_p R_{з_z}\right) + \vec{k}\left(\omega_p R_{з_x}\right), \qquad (9)$$

де $R_з$ – радіус обертання точки $A_з$.

Так як при повороті різцевої головки на кут φ, заготовка також повертається на цей кут, то відповідно відносна кутова швидкість повороту різця буде дорівнювати по величині кутовій швидкості повороту різцевої головки, але протилежною за знаком, тому вектор лінійної швидкості цього повороту знайдемо як векторний добуток вектора кутової швидкості та радіус-вектора $r_з$, проведеного від осі обертання O_1 до розглядуваної точки $A_з$ зовнішньої різальної кромки:

$$\overrightarrow{V_{\varphi з}} = \overrightarrow{\omega_p} \times \overrightarrow{r_з} = \vec{i}\left(\omega_p r_{зz}\right) + \vec{k}\left(-\omega_p r_{зx}\right). \qquad (10)$$

При повороті різця навколо точки O_1 на кут θ, вектор лінійної швидкості також знайдемо як векторний добуток кутової швидкості повороту ω_θ та радіус-вектора $r_з$ за формулою:

$$\overrightarrow{V_\theta} = \overrightarrow{\omega_\theta} \times \overrightarrow{r_з} = \vec{i}\left(\pm\omega_\theta r_{з_z}\right) + \vec{j}\left(\mp\omega_\theta r_{з_x}\right). \qquad (11)$$

Величину вектора кутової швидкості повороту на кут θ можна знайти диференціюванням рівняння (5):

$$\omega_\theta = \frac{d\theta}{d\varphi} = \frac{d}{d\varphi}\left(\frac{R - R\cos\varphi}{r}\right) = \frac{R}{r}\sin\varphi\omega_p . \quad (12)$$

Слід відмітити, що вектор кутової швидкості ω_θ буде змінювати свій знак в залежності від положення різця відносно заготовки. При врізанні різця вектор кутової швидкості буде направлений протилежно осі z_0, а його величина буде зменшуватись при наближенні до середнього перерізу. В середньому перерізі він дорівнює нулю і при переміщенні різця від середнього перерізу до його виходу із заготовки величина вектора кутової швидкості ω_θ буде збільшуватись, а його напрямок буде співпадати з напрямком осі z_0.

Вектор швидкості радіальної подачі V_s буде дорівнювати:

$$\overrightarrow{V_s} = -\vec{j}(Sn) , \quad (13)$$

де S – подача на оберт, мм/об;

n – частота обертання, об/хв.

Вектор швидкості результуючого руху буде дорівнювати сумі всіх векторів швидкостей формоутворюючих рухів різця відносно заготовки, тому для зовнішньої різальної кромки він визначається за формулою:

$$\overrightarrow{V_{ез}} = \begin{Bmatrix} -\omega_p R_{з_z} + \omega_p r_{з_z} \pm \omega_\theta r_{з_z} \\ \mp\omega_\theta r_{з_x} - Sn \\ \omega_p R_{з_x} - \omega_p r_{з_x} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

Остаточно, підставляючи у рівняння складові кутових швидкостей та проекцій радіус векторів на відповідні осі координат отримаємо вектор результуючої швидкості для точки на зовнішній різальній кромці:

$$\overrightarrow{V_{ез}} = \begin{Bmatrix} -\omega_p z_{0з} + \omega_p z_{2з} \pm \frac{R}{r}\sin\varphi\omega_p z_{2з} \\ \mp\frac{R}{r}\sin\varphi\omega_p x_{2з} - 2\pi S\omega_p \\ \omega_p x_{0з} - \omega_p x_{2з} \end{Bmatrix} . \quad (15)$$

Для внутрішньої різальної кромки вектор результуючої швидкості знаходиться аналогічно зовнішньому, але проекції радіус-векторів на осі координат та радіус обертання точки $A_в$ матимуть інші значення.

Отримавши значення інструментальних нормальних кутів різальних кромок інструменту та визначивши кут τ_n між інструментальною та кінематичною площинами різання, можна знайти величини кінематичних нормальних передніх і задніх кутів вздовж різальних кромок інструменту та при різних його положеннях.

Результати досліджень геометричних параметрів різальної частини в процесі нарізання. Оброблюючи арочні зубчасті колеса на верстатах з ЧПК (рис. 4), нарізуються колеса евольвентного профілю в будь-якому торцевому перерізі. При цьому в залежності від положення інструмента (від врізання до виходу різця) та вздовж різальної кромки для випуклої та ввігнутої поверхонь зуба змінюються кінематичні параметри інструмента.

Перш за все ця зміна залежить від кута τ_n між інструментальною та кінематичною площинами різання, який в процесі нарізання зубчастого колеса по різні сторони від середнього торцевого перерізу колеса та для випуклої та ввігнутої сторін нарізуваного зуба приймає протилежні значення (плюс–мінус). В середньому перерізі інструментальна і кінематична площини різання співпадають, тому кут $\tau_n = 0$ і відповідно кінематичні нормальні кути будуть дорівнювати інструментальним.

По-друге зміна кутів вздовж різальної кромки для фасонного профілю інструмента залежить від кута в плані та радіуса обертання розглядуваної точки на різальній кромці.

Для прикладу, за виведеними залежностями визначимо зміну переднього та заднього кутів вздовж зовнішньої, внутрішньої та вершинної різальних кромок в процесі нарізання торцевою різцевою головкою радіуса R = 120 мм зубчастого колеса модулем m = 4 мм, кількості зубів z = 22, ширина B = 20 мм, значення інструментальних кутів становлять: передній вершинний кут $\gamma_{вер} = 0$ та задній вершинний $\alpha_{вер} = 12°$.

На рис. 5 показано зміну передніх та задніх кутів (в градусах) під час різання для трьох положень різця - в момент врізання (*а*), в середньому перерізі (*б*) та при виході його із заготовки (*в*).

Як показали розрахунки (рис. 5, *б*), кінематичні передні та задні кути в середньому перерізі відповідають інструментальним, заданими на вершинній різальній кромці, оскільки кут $\tau_n = 0$. Задні кути на бокових різальних кромках в середньому положенні інструмента не відповідають вершинному $\alpha_{вер} = 12°$, оскільки залежать від кута в плані і біля вершинної різальної кромки мають невеликі значення.

Передні кінематичні кути зовнішньої бокової різальної кромки приймають протилежні значення: при врізанні – позитивні (див. рис. 5, *а*), а при виході із заготовки – негативні (див. рис. 5, *в*). Для внутрішньої різальної кромки характер зміни передніх кутів протилежний. Вздовж різальних кромок передні кути змінюються лише за рахунок різниці радіусів обертання точок профілю інструмента. На вершинній різальній кромці передній кут змінює своє значення з плюса на мінус.

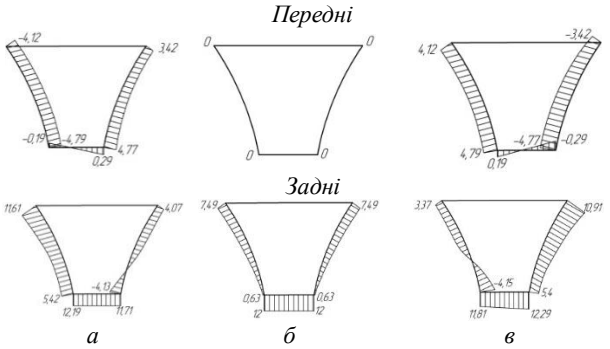


Рис. 5 - Характер зміни передніх та задніх кутів в процесі різання вздовж різальних кромок
(*а* – в момент врізання; *б* – в центральному перерізі; *в* – при виході із заготовки)

Характер зміни задніх кінематичних кутів аналогічний переднім, проте, оскільки вершинний задній інструментальний кут не дорівнює нулю, на бокових різальних кромках його значення загалом позитивне. Однак при вершині різця кінематичний задній кут

приймає негативні значення для зовнішньої різальної кромки в процесі врізання, а для внутрішньої - при виході різця із заготовки.

Це пояснюється тим, що задній боковий інструментальний кут при вершині різця становить невелике значення, а при повороті різцевої головки та відхиленні кінематичної площини різання від інструментальної на кут τ_n, задній кінематичний кут на бокових різальних кромках при вершині різця може приймати негативне значення. При таких значення задніх кінематичних кутів інструмент буде непрацездатним. Тому для проектування та створення працездатного інструменту з кращими геометричними параметрами різальної частини необхідно внести конструктивні особливості при проектуванні такого інструменту.

Конструктивне забезпечення працездатного інструменту. Так як при конструкції різця з зовнішніми та внутрішніми фасонними різальними кромками та способом тангенційного затилування отримати задовільні задні кути на різальних кромках інструменту в процесі різання інколи неможливо при такій схемі обробки, тому необхідно розділити формування зовнішньої та внутрішньої западини зуба на два окремих різця, які матимуть бокову фасонну різальну кромку та вершинну. Ця конструкція інструменту дає змогу застосувати для створення задніх поверхонь різців затилування під кутом [20], при якому поступальний рух різальної кромки здійснюється під деяким кутом τ. Цей спосіб затилування дозволяє отримати в двох точках різальних кромок, в нашому випадку на вершинній та боковій різальних кромках, заданих значень інструментальних нормальних кутів при відповідному значенню кута затилування, який визначається за формулою [19]:

$$\tan\tau = \frac{R_1 \tan\alpha_{1N} \sin\varphi_2 - R_2 \tan\alpha_{2N} \sin\varphi_1}{R_2 \tan\alpha_{2N} \cos\varphi_1 - R_1 \tan\alpha_{1N} \cos\varphi_2}, \quad (16)$$

де α_{1N} і α_{2N} – нормальні інструментальні кути у вибраних точках різальної кромки;

R_1 та R_2 – радіуси обертання вибраних точок;

φ_1 та φ_2 – кути в плані в точках на різальній кромці.

Оскільки при даному способі нарізання арочних коліс кут τ_n між інструментальною та кінематичною площинами різання буде змінювати своє значення від негативного до позитивного в залежності від кута повороту різцевої головки при формуванні кожної сторони западини зуба, а мінімальне допустиме значення задніх кутів в процесі різання має становити 2-3º, тому при виборі інструментальних кутів у вибраних точках різальної кромки слід керуватись наступною формулою:

$$\alpha_{Ni} = 2 \div 3^\circ + |\tau_n|. \quad (17)$$

Для розглядуваного прикладу для зовнішньої різальної кромки значення кута між інструментальною та кінематичною площинами різання становить $\tau_{пз}$ = 4,77º, а для внутрішньої різальної кромки - $\tau_{пз}$ = 4,79º. Тому для забезпечення задовільних значень кутів 2-3º в процесі різання слід прийняти наступні значення бокових інструментальних нормальних кутів для зовнішньої та внутрішньої різальних кромок: $\alpha_{Nз} = \alpha_{Nв}$ = 7º. На вершинній різальній кромці при $\tau_{пвер}$ = 0,29º приймаємо $\alpha_{Nвер}$ = 8º.

За формулою (16) для точки вершинної різальної кромки при $\alpha_{Nвер}$ = 8º, R_1 = 120 мм, φ_1 = 90º та для точки на боковій зовнішній різальній кромці при вершині різця при $\alpha_{Nз}$ = 7º, R_2 = 122,15 мм, φ_2 = 2,98º кут затилування буде дорівнювати τ = 71º.

Висновки. Розроблена методика визначення кінематичних геометричних параметрів різців головки при нарізанні точних арочних зубчастих коліс з додатковими зміщеннями заготовки та різцевої головки на верстатах з ЧПК, яка дозволяє розрахувати та проаналізувати геометричні параметри такого інструменту в процесі роботи і оцінити його працездатність. Як приклад, наведено застосування цієї методики для гострозаточених ножів фрези з нульовим переднім кутом. Забезпечення більш стабільних кутів на різальній кромці може бути забезпечено створенням інших форм передніх та задніх поверхонь, та їх розташування під визначеними в відповідності до отриманих залежностей інструментальними кутами.

Список литературы

1. *Равская Н. С.* Технологические особенности изготовления арочных зубчатых передач / Н. С. Равская, А. А. Клочко, С. П. Воробьев // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія Машинобудування. – 2015. - № 72. - С. 181-189.
2. *Беляев А. И.* Результаты испытаний арочных зубьев колес на износ и сопротивление усталости при изгибе / А. И. Беляев, А. И. Сирицын, Д. А. Сирицын. // Вестник машиностроения. – 1997. – № 1. – С. 6–8.
3. *Dai Y.* Study on a Cylindrical Gear with Curved Tooth Traces / Y. Dai, Y. Ariga, S. Nagata // Proceedings of the Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms. – 1999. - V. 6. - P. 2337-2342.
4. *Tseng R.-T.* Contact Characteristics of Cylindrical Gears With Curvilinear Shaped Teeth / R.-T. Tseng, C.-B. Tsay // Mech. Mach. Theory. – 2004. – V. 39. - P. 905–919.
5. *Беляев А. И.* Особенности изготовления и применения высокоточных арочных тяговых зубчатых передач / А. И. Беляев, А. И. Сирицын, Д. А. Сирицын. // Вестник машиностроения. – 1997. – № 1. – С. 3–6.
6. *Добротворский С.С.* Перспективы применения передовых технологий в зубообработке конических колес с круговыми зубьями / С.С. Добротворский, А.А. Клочко, Е.В. Басова и др. // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2016. – №2 (12) – С. 10-14
7. *Равська Н. С.* Радіус кривизни зуба циліндричного арочного зубчастого колеса / Н. С. Равська, О. О. Клочко, С. П. Воробйов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. – 2016. - № 38. – С. 55-60.
8. *Arafa H. A.* C-Gears: a Novel Design Paradigm for Rotorcraft Transmissions / H. A. Arafa, M. Bedewy // Presented at AHS/AIAA/SAE/RAeS 2010 International Powered Lift Conference (IPLC), Philadelphia, PA, USA, 2010.
9. *Маликов А. А.* Конструктивно-технологические преимущества цилиндрических колес с арочными зубьям // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2008. – № 1. - С. 198–205.
10. *Arafa H. A.* C-Gears: Geometry and Machining // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2005. - V. 219. - P. 709-726.
11. *Arafa H. A.* Manufacturability and viability of different c-gear types: a comparative study / H. A. Arafa, M Bedewy // Presented at Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Chicago, IL, USA, 2012.
12. *Aiping S.* Involute arc cylindrical gear and its mesh characteristics / S. Aiping, Y. Hong, T. Wencheng, N. Zhonghua, L. Luyang // China Mechanical Engineering. – 2006. – V. 9 (18). - P. 1888-1892.
13. *Xuegang Z.* Desing, meshing chracteristics and stress analysis of cylindrical gears with curvilinear tooth profile / Z. Xuegang, X. Yongchun, T. Xingqiang // Transactions of FAMENA. – 2016. - Vol. 40. – P. 27-44.

14. *Sonoda K.* Design and Manufacture of New Circular-Arc Tooth-Trace Gears / K. Sonoda, K. Takenouchi, S. Hashimura // Presented at The 3rd International Conference on Design Engineering and Science. Pilsen, Czech Republic, 2014.

15. *Плахтин В. Д.* Параметры пальцевой фрезы и станочного зацепления при изготовлении зубчатых колес с арочными зубьями / В. Д. Плахтин, А. П. Давыдов, А. Н. Паршин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2007. - № 4. - С. 95-102.

16. *Виноградов А. Н.* Эвольвентные арочные передачи / А. Н. Виноградов, А. П. Давыдов, С. И. Липатов и [др.] // Межотраслевой альманах ДСР. - 2011. – № 31. – С. 42–45.

17. *Пат. 103983* Україна, МПК B23F 21/22 (2006.01),B23F 9/00 Різцева головка для нарізання циліндричних зубчастих коліс з криволінійними по довжині зубцями / Польовий В.І. - Заяв. 05.03.2013; Опубл. 25.06.2013, Бюл.№ 12.

18. *Воробйов С. П.* Формоутворення циліндричних арочних зубчастих коліс з евольвентним профілем різними способами // Вісник кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. –2016. – Вип. 2 (97), ч.1. – С. 52–56.

19. *Равська Н. С.* Методика аналітичного визначення геометричних параметрів різальної частини інструменту / Н. С. Равська, Т. П. Ніколаєнко, Д. О. Сільчин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2009. – Вип. 6 (154). – С. 118–129.

20. *Родин П. Р.* Основы проектирования режущих инструментов: учеб. – К.: Выща шк., 1990. – 424 с.

References (transliterated)

1. Ravskaja, N. S., Klochko, A. A., Vorob'ev, S. P. Tehnologicheskie osobennosti izgotovlenija arochnyh zubchatyh peredach [Technological features of making arched gears]. *Visnik nacional'nogo tehnichnogo universitetu Ukraïni «Kiïvs'kij politehnichnij institut», serija Mashinobuduvannja*. 2015, no. 72, pp. 181-189.

2. Beljaev, A. I., Siricyn, A. I., Siricyn, D. A. Rezul'taty ispytanij arochnyh zub'ev koles na iznos i soprotivlenie ustalosti pri izgibe [Results of tests of arched wheel teeth on wear and fatigue resistance in bending]. *Vestnik mashinostroenija*. 1997, no. 1, pp. 6-8.

3. Dai, Y., Ariga, Y., Nagata, S. Study on a Cylindrical Gear with Curved Tooth Traces. *Proceedings of the Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*. 1999, vol. 6, pp. 2337-2342.

4. Tseng, R.-T., Tsay, C.-B. Contact Characteristics of Cylindrical Gears With Curvilinear Shaped Teeth. *Mech. Mach. Theory*. 2004, vol. 39, pp. 905–919.

5. Beljaev, A. I., Siricyn, A. I., Siricyn, D. A. Osobennosti izgotovlenija i primenenija vysokotochnyh arochnyh tjagovyh zubchatyh peredach [Features of manufacturing and application of high-precision arched traction gears]. *Vestnik mashinostroenija*. 1997, no. 1, pp. 3–6.

6. Dobrotvorskyy S.S., Klochko A.A. Basova E.V., ets. Perspektivyi primeneniya peredovyih tehnologiy v zuboobrabotke konicheskih koles s krugovyimi zubyami [Prospects for the use of high-end technologies in the processing of bevel gears with circular teeth] *Matematicheskoe modelirovanie i programmnoe obespechenie proizvodstvennyih protsessov*. Magnitogorsk. 2016. No2(12). Pp 10-14.

7. Ravs'ka, N. S., Klochko, O. O., Vorobjov, S. P. Radius krivizni zuba cilindrichnogo arochnogo zubchastogo kolesa [Radius of the curvature of the tooth of a cylindrical arched toothed wheel]. *Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih system* [Reliability of the instrument and optimization of technological systems]. Kramators'k, 2016, no. 38, pp. 55–60.

8. Arafa, H. A., Bedewy, M. C-Gears: a Novel Design Paradigm for Rotorcraft Transmissions. *International Powered Lift Conference (IPLC)*. Philadelphia, PA, USA, 2010, vol. 1, pp. 93-100.

9. Malikov, A. A. Konstruktivno-tehnologicheskie preimushhestva cilindricheskih koles s arochnymi zub'jam [Structural and technological advantages of cylindrical wheels with arched teeth]. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. 2008, no. 1, pp. 198-205.

10. Arafa, H. A. (2005) C-Gears: Geometry and Machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering*. 2005, vol. 219, pp. 709-726.

11. Arafa, H. A., Bedewy, M. Manufacturability and viability of different c-gear types: a comparative study. *Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*. Chicago, IL, USA, 2012, vol. 5, pp. 381-391.

12. Aiping, S., Hong, Y., Wencheng, T., Zhonghua, N., Luyang, L. Involute arc cylindrical gear and its mesh characteristics. *China Mechanical Engineering*. 2006, vol. 9 (18), pp. 1888-1892.

13. Xuegang, Z., Yongchun, X., Xingqiang, T. Desing, meshing chracteristics and stress analysis of cylindrical gears with curvilinear tooth profile. *Transactions of FAMENA*. 2016, vol. 40, pp. 27-44.

14. Sonoda, K., Takenouchi, K., Hashimura, S. Design and Manufacture of New Circular-Arc Tooth-Trace Gears. *The 3rd International Conference on Design Engineering and Science*. Pilsen, Czech Republic, 2014, vol. 1, pp. 49-52.

15. Plahtin, V. D., Davydov, A. P., Parshin, A. N. Parametry pal'cevoj frezy i stanochnogo zaceplenija pri izgotovlenii zubchatyh koles s arochnymi zub'jami [Parameters of the pin mill and machine engagement in the manufacture of gears with arched teeth]. *Problemy mashinostroenija i avtomatizacii*. 2007, no. 4, pp. 95-102.

16. Vinogradov, A. N., Davydov, A. P., Lipatov, S. I., Margolit, R. B., Pankov, I. G., Parshin, A. N. Jevol'ventnye arochnye peredachi. *Mezhotraslevoj al'manah DSR*. 2011, no. 31, pp. 42-45.

17. Pol'ovij, V.I. *Rizceva golovka dlja narizannja cilindrichnih zubchastih kolis z krivolinijnimi po dovzhini zubcjami* [Cutting head for cutting cylindrical gears with crown-lengthened teeth], Patent UA no. 103983, 2013.

18. Vorobjov, S. P. Formoutvorennja cilindrichnih arochnih zubchastih kolis z evol'ventnim profilem riznimi sposobami [Formation of cylindrical arched gears with an engraving profile in various ways.]. *Visnik kremenchuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Ostrograds'kogo*. 2016, no. 2 (97), pp. 52-56.

19. Ravs'ka, N. S., Nikolaєnko, T. P., Sil'chin, D. O. Metodika analitichnogo viznachennja geometrichnih parametriv rizal'noï chastini instrumentu [Method of analytical determination of geometrical parameters of the cutting part of the instrument]. *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnichnogo universitetu. Serija: Mashinobuduvannja i mashinoznavstvo* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Machine Building and Machine Science]. Donetsk, 2009, no. 6 (154), pp. 118-129.

20. Rodin, P. R. (1990) *Osnovy proektirovanija rezhushhih instrumentov* [Basics of cutting tools design]. Kiev, Vyshha shk. Publ., 1990. 424 p..

Поступила (received) 18.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Визначення геометричних параметрів різців головки при нарізанні точних арочних зубчастих коліс / Н. С. Равська, В. В. Вовк, С. П. Воробйов, Є.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 31–38. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-004X.

Определение геометрических параметров резцов головки при нарезании точных арочных зубчатых колес / Н. С. Равская, В. В. Вовк, С. П. Воробьев, Е.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – №26 (1248). – С. 31–38. – Библиогр.: 20 назв. – ISSN 2079-0023.

Research precision parameters for generating gear grinding bobbin wheel profile of gerotor / N. Ravskaya, V. Vovk, S. Vorobiev, E. Basova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P. 31 –38. – Bibliogr.: 20. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Равська Наталія Сергіївна - доктор технічних наук, професор кафедри «Інтегровані технології машинобудування» Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, тел.: (067) 127-6198, (066) 228-1798; e-mail: nravska@ukr.net;

Равская Наталия Сергеевна - доктор технических наук, профессор кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, тел.: (067)127-6198, (066)228-1798; e-mail: nravska@ukr.net;

Ravskaya Natalia Sergeevna - Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Integrated Manufacturing Engineering" National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, tel.: (067) 127-6198, (066) 228-1798; E-mail: nravska@ukr.net;

Вовк В’ячеслав Володимирович - кандидат технічних наук, доцент кафедри «Інтегровані технології машинобудування» Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, тел.: (067)9767154; e-mail: 010479@ukr.net;

Вовк Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, тел.: (067)9767154; e-mail: 010479@ukr.net;

Vovk Vyacheslav Vladimirovich - Candidate of Technical Sciences., Assistant professor of the chair "Integrated Manufacturing Engineering" National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, tel .: (067) 9767154; E-mail: 010479@ukr.net;

Воробйов Сергій Петрович - аспірант кафедри «Інтегровані технології машинобудування» Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, тел .: (093) 742-6389; e-mail: vorobyov_sp@ukr.net;

Воробьев Сергей Петрович – аспирант кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, тел.: (093)742-6389; e-mail: vorobyov_sp@ukr.net;

Vorobiev Sergey Petrovich - post-graduate student of the chair "Integrated Manufacturing Engineering" National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, tel .: (093) 742-6389; E-mail: vorobyov_sp@ukr.net;

Басова Євгенія Володимирівна – канд. технічних наук, доцент кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

Басова Евгения Владимировна – канд.. технических наук, доцент кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехничемктй университет», г. Харьков; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

Basova Evgenia Vldimirovna- Candidate of Technical Sciences, Docent of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25; e-mail: evgeniya.ivaschenko@mail.ru.

УДК 621.039.57

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Б.А. АЛЕКСЕНКО, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБТЕКАНИЯ СЛОЯ АДСОРБЕНТА В ПОЛОСТИ АДСОРБЦИОННОЙ КОЛОННЫ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА НАИЛУЧШЕЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Розглянуто моделі турбулентності, що використовуються в сучасних програмах розрахунку гідродинамічних течій. Проведено дослідження щодо вибору найкращої моделі турбулентності для використання при розрахунку аеродинамічної моделі обтікання шару адсорбенту у об'ємі адсорбційної колони осушувача. Практично підтверджена за критерієм збіжності рішення оптимальність використання «Spalart-Allmaras (SA) моделі» турбулентності. Виконано апробацію моделі шляхом порівняння отриманих результатів рішення з результатами розрахунків, проведених із застосуванням альтернативних моделей турбулентності.

Ключові слова: моделювання, модель турбулентності, повітряний потік, аеродинаміка.

Рассмотрены модели турбулентности, используемые в современных программах расчёта гидродинамических течений. Проведено исследование по выбору наилучшей модели турбулентности для использования при расчете аэродинамической модели обтекания слоя адсорбента в полости адсорбционной колонны адсорбционного осушителя. Практически подтверждена по критерию сходимости решения оптимальность применения «Spalart-Allmaras (SA) модели» турбулентности. Выполнена аппробация модели путем сравнения полученных результатов решения с результатами расчетов, произведенных с применением альтернативных моделей турбулентности.

Ключевые слова: моделирование, модель турбулентности, воздушный поток, аэродинамика.

Considered the turbulence models used in modern programs of calculation of hydrodynamic flows. Made a study on the selection of the best model of turbulence for use in the calculation of wind flow model of the adsorbent layer in the cavity of the adsorption tower desiccant dryer. Practically confirmed, by the criterion of convergence, the optimal use of "Spalart-Allmaras (SA) model" of turbulence. The model was tested by comparing the results obtained with the results solutions made with the use of alternative models of turbulence.

Keywords: modeling, turbulence model, airflow aerodynamics.

Введение. Математическое моделирование турбулентных течений является исключительно актуальной и быстро развивающейся областью классической и вычислительной гидро- и аэродинамики, при этом ключевым вопросом является поиск приемлемого компромисса между физической адекватностью модели и приемлемым для практического применения уровнем ее сложности [1]. Представление о приемлемости компромисса быстро эволюционирует в сторону все более сложных моделей, что, в свою очередь, требует проведения новых исследований, направленных на определение границ их применимости.

Анализ последних исследований и литературы. В настоящий момент создано большое количество разнообразных моделей для расчёта турбулентных течений: "Spalart-Allmaras", k-e, k-w и ее разновидности, модель Рейнольдсовых напряжений "RSM", "LES" и т. д. [2]. Они отличаются друг от друга сложностью решения и точностью описания течения. Данные модели применяются в различных инженерных расчётах в зависимости от необходимой точности. Практически все они реализованы в современных программах расчёта гидродинамических течений, таких как FlowVision, Autodesk Simulation CFD, Fluent, CFX или OpenFOAM. Все модели имеют преимущества и недостатки.

Цель работы. В настоящей работе рассматривается проблема выбора модели турбулентности, наиболее подходящей для исследования особенностей протекания воздушного потока через слой адсорбирующего вещества методом моделирования указанного процесса с использованием программного пакета FlowVision. Основной целью данной работы является сравнение моделей турбулентности предлагаемых FlowVision, а также их применимости с точки зрения используемых в процессе расчета вычислительных ресурсов.

Постановка проблемы. В ходе математического моделирования процесса протекания потока продувочного воздуха через слой адсорбирующего вещества в потоке наблюдается возникновение зон турбулентности и разности давления (рис. 1). Поскольку скорость газового потока, его турбулентность, температура и давление оказывают большое влияние на скорость динамического испарения, играющую большую роль в процессе регенерации адсорбента, моделирование и изучение протекания продувочного воздуха через слой адсорбента имеет большое значение. При этом возникает проблема выбора модели для расчёта турбулентных течений.

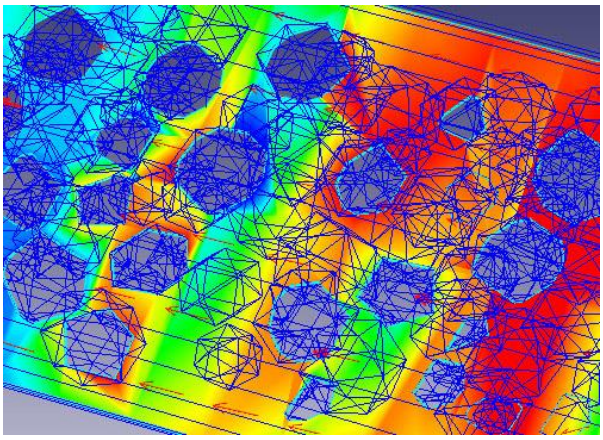


Рис. 1. – Моделирование процесса протекания потока продувочного воздуха через слой адсорбирующего вещества (Градиент Плотность среды)

© С.С. Добротворский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская, 2017

На данный момент не существует универсальной модели турбулентности для широкого диапазона течений. Выбор модели турбулентности зависит от характера турбулентного потока, требуемой точности, доступных вычислительных ресурсов и временных затрат необходимых на процесс моделирования. Для адекватного выбора модели турбулентности необходимо четко представлять свойства и ограничения каждой модели турбулентности.

В настоящем исследовании модель турбулентности выбирается для изучения процесса протекания продувочного воздуха сквозь слой адсорбирующего вещества в адсорбционной колонне осушителя в течение цикла регенерации адсорбента.

Материалы исследований.

Поскольку дать стопроцентную рекомендацию по выбору модели турбулентности в определенных ситуациях практически невозможно, следует, выбрав некоторый критерий, провести экспериментальное сравнение имеющихся моделей и, опираясь на полученные результаты, определиться с моделью турбулентности для конкретной решаемой задачи. Данное исследование проводится путем использования математических методов моделирования исследуемого процесса с применением программного пакета FlowVision, поскольку данный программный продукт позволяет проводить многокритериальную многопараметрическую оптимизацию расчета исследуемой модели за минимальное число итераций.

Для рассмотрения проблемы расчета турбулентности потока используем уравнение Навье-Стокса (1).

$$X+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right)=\frac{du_x}{dt}$$
$$Y+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial p_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right)=\frac{du_y}{dt} \quad (1)$$
$$Z+\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial p_{zz}}{\partial z}\right)=\frac{du_z}{dt},$$

где: X, Y, Z – удельные массовые силы, м/с^2 ,
p_{xx}, p_{yy}, p_{zz} – проекции нормального напряжения на оси координат, Па,
ρ - плотность, кг/м^3 ,
τ_{ij} – касательные напряжения, Па,
$\frac{du_x}{dt}=\frac{\partial u_x}{\partial t}+\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2}$ – полное ускорение частицы вдоль оси X, м/с^2 ,
u_x, u_y, u_z – проекции скорости на оси координат, м/с.

Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) используется совокупность полуэмпирических соотношений, в том числе и дифференциальных уравнений, называемых моделью турбулентности. Вопросы замыкания уравнений Рейнольдса решаются на различном уровне сложности, что предопределяет большое разнообразие полуэмперических моделей турбулентности – от сравнительно простых моделей нулевого порядка до моделей с несколькими дополнительными уровнями переноса. Нестационарное решение точных уравнений Навье-Стокса для сложных потоков с большим числом Рейнольдса на данный момент является невозможным. Выделяют два альтернативных способа представления уравнений Навье-Стокса в которых не учитываются мелкомасштабные турбулентные пульсации: метод осреднения по правилам Рейнольдса и метод фильтрации. Обе методики требуют дополнительных уравнений для замыкания всей системы [2]. Также модели турбулентности отличают по числу дифференциальных уравнений, вводимых в дополнение к исходной системе уравнений движения и теплопереноса. Увеличение числа уравнений требует привлечения дополнительной информации полуэмпирического характера для определения модельных коэффициентов и функций, что снижает универсальность модели.

Так, в алгебраических моделях (нулевого порядка) связь между тензором рейнольдсовых напряжений и характеристиками среднего движения задается алгебраическими соотношениями. Современные модели турбулентности данной группы основаны на представлениях о двухслойной структуре турбулентного пограничного слоя и область их применения ограничивается узкой специализацией.

Нелинейные модели турбулентной вязкости получили широкое распространение из-за относительной простоты, вычислительной эффективности и приемлемости для широкого круга свободных и пристенных турбулентных течений. Данная концепция предполагает, что перенос количества движения происходит так же, как и перенос за счет молекулярного движения.

Данные модели характеризуются медленной сходимостью, в связи с чем в вычислительной практике используются сравнительно редко. Сложность расчетов нелинейных моделей приблизительно на 20 % выше, по сравнению с расчетами моделей линейных.

Один из необходимых этапов совершенствования дифференциальных моделей турбулентности состоит в устранении или существенном уменьшении влияния эффектов численной диффузии в расчетах циркуляционных течений. Утверждение о том, что моделирование турбулентности неотделимо от проблем численной реализации моделей турбулентности, в настоящее время является очевидным.

Метод осреднения уравнений Навье-Стокса, предполагающий запись уравнений переноса осредненного по времени потока, со всеми предполагаемыми масштабами турбулентности, значительно уменьшает вычислительные ресурсы, необходимые для решения численной задачи. В том случае, если осредненный поток является стационарным, то основные уравнения не содержат производных по времени и установившееся решение получается более экономичным. Метод осреднения уравнений Навье-Стокса используется в таких моделях турбулентности, как: "Spalart-Allmaras", k-e и ее разновидностях, k-w и ее разновидностях, моделях Рейнольдсовых напряжений "RSM".

Моделирование крупных вихрей "LES" (Lage Eddy Simulations) и использует альтернативный подход, в котором большие вихри решены в нестационарной постановке с использованием системы, так называемых, «фильтрующих» уравнений. Набор «фильтрующих» уравнений по существу служит для исключения из расчета подсеточных вихрей, т. е. вихрей, размер которых меньше ячеек расчетной сетки. Как и в случае осреднения по Рейнольдсу, процесс фильтрации требует добавления специальных уравнений для замыкания всей системы. Статистические величины осредненного потока, которые в основном и имеют практический интерес, представляются в зависимости от времени. Привлекательность "LES" модели заключается в том, что она рассчитывает потери, вызванные самим режимом турбулентного течения, в отличие от моделей турбулентности относящихся к классу "RANS". Применение "LES" модели в промышленных задачах крайне ограничено. Типичное применение данной модели было найдено лишь в достаточно простых геометрических областях, что в основном связано с высокими требованиями данной модели к вычислительным ресурсам.

В моделях турбулентности "Spalart-Allmaras", k-e моделях и k-w моделях используется Гипотеза Буссинеска [3], которая предполагает, что, по аналогии с вязкими напряжениями в ламинарных потоках, турбулентные напряжения пропорциональны градиенту осредненной скорости. Эта гипотеза базируется на рассмотрении турбулентных вихрей как частиц, подобных молекулам в кинетической теории. То есть, вихри заменяют молекулы в роли носителей тепловой энергии и количества движения. Преимущество этой методики заключается в небольших вычислительных ресурсах.

Модель турбулентности "Spalart-Allmaras" является относительно простой, с одним дополнительным уравнением переноса турбулентной вязкости и с точки зрения вычислительных ресурсов является самой экономичной. Эта модель является хорошим выбором для задач с грубой сеткой. Однако, модель "Spalart-Allmaras" является относительно новой и ее использование для широкого класса турбулентных потоков является еще не аппробированным.

Широкое применение в решении практических инженерных задач получила стандартная k-e модель, предложенная Лаундером и Сполдингом [4]. Ошибкоустойчивость, экономичность, и разумная точность для широкого диапазона турбулентных потоков делает ее наиболее применимой в промышленных задачах. Постоянные коэффициенты для этой модели турбулентности получены опытным путем и поэтому она является полуэмпирической. Стандартная k-e модель требует несколько больших вычислительных ресурсов по сравнению с моделью "Spalart-Allmaras", т.к. описывается двумя дополнительными уравнениями переноса.

На базе стандартной k-e с учетом ее недостатков были созданы "RNG" k-e модель и "Realizable" k-e модели. "Realizable" k-e модель требует несколько больших вычислительных усилий по сравнению со стандартной k-e моделью, из-за дополнительных условий и функций в основных уравнениях, а также из-за большей степени нелинейности. Вычисления с помощью "RNG" k-e модели занимает на 10-15% времени центрального процессора больше, чем в случае стандартной k-e модели.

Подобно k-e моделям, k-w модели также являются двухпараметрическими и требуют некоторых вычислительных усилий."SST" k-w модель эффективно сочетает устойчивость и точность стандартной k-w модели в пристеночных областях и k-e модели на удалении от стенок, для этого k-e модель была конвертирована в k-w модель.

Модель Рейнольдсовых напряжений "RSM" (Reynolds Stress Model) и является одной из самых сложных моделей турбулентности. Эта модель не использует предположение о изотропности турбулентной вязкости, а для замыкания уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, решает уравнения переноса для Рейнольдсовых напряжений совместно с уравнением для скорости турбулентной диссипации. По сравнению с k-e и k-w моделями турбулентности "RSM" требует дополнительную память и время центрального процессора из-за увеличения числа уравнений переноса Рейнольдсовых напряжений, также "RSM" модель может потребовать большего количества итераций по сравнению с двухпараметрическими моделями, поскольку в ней заложена ярко выраженная взаимосвязь между Рейнольдсовыми напряжениями и осредненным потоком. В среднем "RSM" требует на 50-60% времени CPU больше, чем двухпараметрические модели турбулентности и на 15-20% больше оперативной памяти. [3] Однако модель "RSM" незаменима в ситуациях, когда анизотропность турбулентного потока оказывает доминирующее влияние на осредненный поток (в высокоскоростных вращающихся потоках и потоках с развитыми вторичными течениями) и имеет больший потенциал для более точного расчета сложных потоков (циклоны, сильно закрученные потоки в камерах сгорания, вращающиеся области, и т. д.)

Помимо временных затрат на итерационный процесс, выбор модели турбулентности может повлиять на сходимость численного решения. Например, стандартная k-e модель является в некоторых случаях сверхдиффузионной, в то время, как "RNG k-e" модель разработана такой, что турбулентная вязкость уменьшается при резких изменениях напряжений. Так как диффузия положительно влияет на сходимость численного решения, то вероятно, что "RNG k-e" модель будет более восприимчивой к неустойчивости в стационарных задачах. Однако, это не является недостатком "RNG k-e" модели, т. к. эта характеристика делает ее более отзывчивой к физической нестабильности, такой как временнозависимые потери турбулентных вихрей.

Для практического сопоставления моделей турбулентности в программной среде FlowVision, была построена аэродинамическая модель обтекания сложной поверхности, образованной группой объемов сферической формы (рис. 2), что обусловлено дальнейшей необходимостью использования модели в процессе расчета условий обтекания слоя адсорбента в полости адсорбционной колонны.

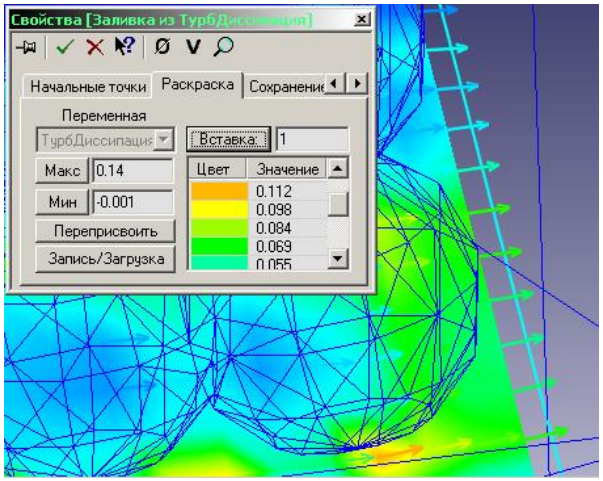


Рис. 2 – Расчет испытательной аэродинамической модели ("Стандартная к-е модель" турбулентности).

Оценка скорости расчета моделей турбулентности проводилась по критерию сходимости численного решения при проведении расчетов по каждой из моделей турбулентности при неизменных параметрах расчета (прил. 1.)

В процессе проведения расчетов получены итерационные графики сходимости решений в процессе расчетов с использованием различных моделей турбулентности (см. рис. 3.1 – 3.7.), практически подтверждающие по критерию сходимости решения преимущество использования "Spalart-Allmaras" модели, как обеспечивающей сходимость решения по уровню <0.1 за 50-70 итераций (см. рис. 3.4.), по сравнению с иными моделями турбулентности, показатель сходимость решения которых по таким расчетным величинам как турбулентная энергия и турбулентная диссипация, за 100 (и более) итераций превышал 0,2 ("SST модель" турбулентности, см. рис. 3.5.), а для прочих моделей не опускался ниже 0,4 (см. рис. 3.1, рис. 3.2, рис. 3.3, рис. 3.6, рис. 3.7.).

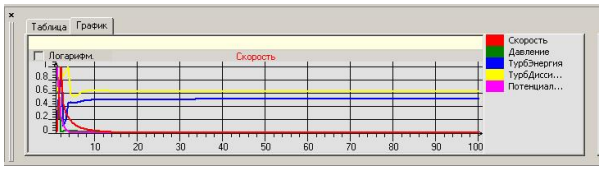


Рис. 3.1 – График сходимости решения, "Стандартная к-е модель" турбулентности

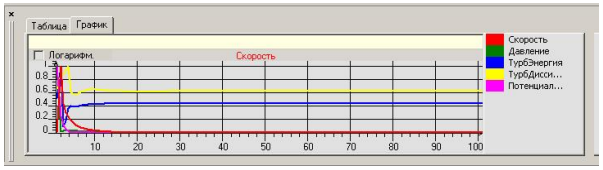


Рис. 3.2 –График сходимости решения, "Низко-Re k-е модель AKN" турбулентности

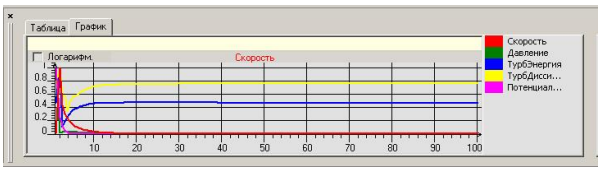


Рис. 3.3 – График сходимости решения, "Квадратичная k-е модель AKN" турбулентности.

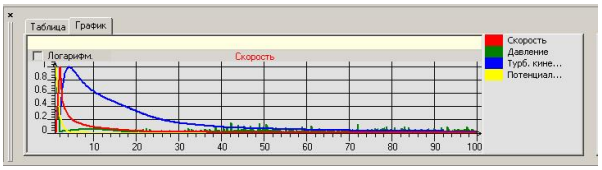


Рис. 3.4 – График сходимости решения, "Spalart-Allmaras модель" турбулентности.

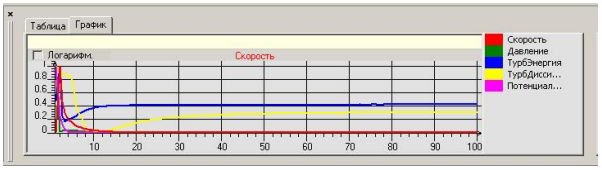


Рис. 3.5 – График сходимости решения, "SST модель" турбулентности.

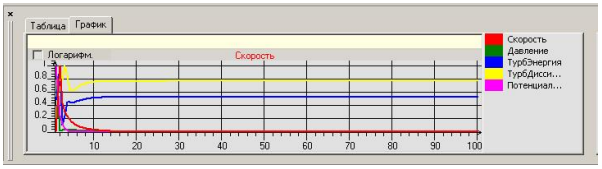


Рис. 3.6 – График сходимости решения, "Низко-Re HL" турбулентности.

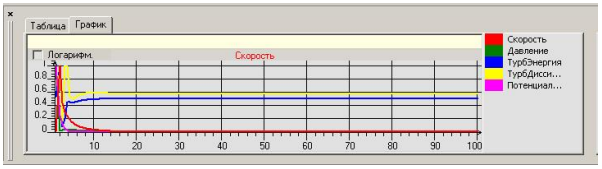


Рис. 3.7 – График сходимости решения, "Низко-Re LS модель" турбулентности.

Приложение 1

Параметры проведения расчетов

Начальные параметры FlowVision		
Параметр		**Значение**
Pr	Число Прандтля	1
Sc	Число Шмидта	1
T-pl	Модель Т-пульсации	Простая
Ka	Число Кармана	0,41
Константа шероховатости		0,246
ΔP (Port1-Port2)		70 kPa
Шаги: неявная схема, КФЛ = 1		Max s. = 1

Результаты исследования. В ходе проводимого исследования выбрана наилучшая модель турбулентности для использования при расчете аэродинамической модели обтекания слоя адсорбента в полости адсорбционной колонны адсорбционного осушителя.

Ценность исследования. Практически подтверждена по критерию сходимости решения оптимальность применеия "Spalart-Allmaras (SA) модели" турбулентности.

Выполнена аппробация модели путем сравнения полученных результатов решения с результатами расчетов, произведенных с применением альтернативных моделей турбулентности.

Список литературы

1. Добротворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.55(42). – С. 25-31.
2. Гарбарук А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур – СПб: Изд-во Политехн. ун- та, 2012. – 88 с.
3. Алексин В. А. Матеатические модели турбулентных течений: Учебное пособие. — М.: МГИУ, 2008. — 54 с.
4. Черный С. Г., Шашкин П. А., Грязин Ю. А. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе (k −ε)-моделей // Вычисл. технологии. 1999. Т. 4, №2. С. 74–94.
5. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с. – ISBN 978-5-9221-0920-8.

Bibliography (transliterated)

1. Dobrotvorskiy S.S., Basova E.V., Dobrovolskaya L.G. etc. Povyishenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitelnogo proizvodstva v sovremennyih usloviyah [*Increase of competitiveness of domestic machine-building production in modern conditions*] Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. No.55(42). pp. 25-31.
2. Garbaruk A.V., Strelets M.H. Modelirovanie turbulentnosti v raschetah slozhnyih techeniy: uchebnoe posobie. SunctPiterburg: Izd-vo Politehn. un- ta. 2012. 88 p. Print.
3. Aleksin V. A. Mateaticheskie modeli turbulentnyih techeniy: Uchebnoe posobie. Moscow. MGIU. 2008. 54 p. Print.
4. Chernyiy S. G., Shashkin P. A., Gryazin Yu. A. Chislennoe modelirovanie prostranstvennyih turbulentnyih techeniy neszhimaemoy zhidkosti na osnove (k-ε)-modeley. Vyichisl. tehnologii. 1999. Vol. 4, No2. pp. 74–94.
5. Volkov K.N., Emelyanov V.N. Modelirovanie krupnyih vihrey v raschetah turbulentnyih techeniy. Moscow. FIZMATLIT. 2008. 368 P. ISBN 978-5-9221-0920-8.

Поступила (received) 05.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Удосконалення процесу розрахунку аеродинамічної моделі обтікання шару адсорбенту в порожнині адсорбційної колони за рахунок вибору найкращої моделі турбулентності / С.С. Добротворський, Б.О. Алексенко, Л.Г. Добровольська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248) – С. 39–43. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Совершенствование процесса расчета аэродинамической модели обтекания слоя адсорбента в полости адсорбционной колонны за счет выбора наилучшей модели турбулентности / С.С. Добротворский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248) – С. 39–43. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

Improving the process of calculating the aerodynamic flow around the model of the adsorbent layer in the cavity of the adsorption columns by selecting the best model of turbulence / S. Dobrotvorskyy, B. Aleksenko, L. Dobrovolska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No 26 (1248). – P. 39–43. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Добротвірської Сергій Семенович - доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел .: (057) -720-66-25; e-mail: sdobro@mail.ru.

Добротворский Сергей Семенович – доктор технических наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: sdobro@mail.ru.

Dobrotvorsky Sergey Semenovich - Doctor of Technical Sciences, Professor of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: sdobro@mail.ru.

Алексенко Борис Олександрович - аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Алексенко Борис Александрович – аспирант Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Aleksenko Boris Aleksandrovich – postgraduate of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

Добровольська Людмила Георгіївна - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

Добровольская Людмила Георгиевна **–** кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

Dobrovol'skaya Lyudmila Georgiyevna - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

УДК 621.7

Я.Н. ГАРАЩЕНКО

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Представлено задачі технологічної підготовки виготовлення виробів з використанням адитивних технологій. Розглянуто можливість оцінки технологічності конструкції виробів на основі аналізу вихідної 3D моделі за складовими складності виробу: геометричній, структури матеріалів, ієрархічної та функціональної. Розроблена система показників дозволяє визначати технологічність при відпрацюванні конструкції виробу. На етапі технологічної підготовки запропонована система показників дозволяє виконувати задачу по раціональному вибору способу і стратегії виготовлення.

Ключові слова: адитивні технології, технологічна підготовка, тріангуляційна модель, геометрична складність виробу, технологічність.

Представлены задачи технологической подготовки изготовления изделий с использованием аддитивных технологий. Рассмотрена возможность оценки технологичности конструкции изделий на основе анализа исходной 3D модели по составляющим сложности изделия: геометрической, структуры материалов, иерархической и функциональной. Разработана система показателей, позволяющих определять технологичность при отработке конструкции изделия. На этапе технологической подготовки предложенная система показателей позволяет выполнять задачи по рациональному выбору способа и стратегии изготовления.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технологическая подготовка, триангуляционная модель, геометрическая сложность изделия, технологичность.

Tasks of production design of additive technologies are presented. The possibility of evaluation of production design is considered on the basis of initial 3D model analysis. The analysis makes by components of product complexity: geometry, material structure, hierarchical and functional. The developed system of indicators determines the manufacturability during the testing of product design. The proposed system of indicators allows for the stage of production design to perform the task of a rational choice of method and manufacture strategy.

Keywords: additive manufacturing, technology planning, triangulated model, geometrical complexity of products, manufacturability.

Введение. Интенсивное развитие аддитивных технологий (Additive Manufacturing) и их особенности по изготовлению изделий сложной геометрии создает потребность в разработке научно обоснованной методологии оценки технологичности изделий для рационального выбора стратегии изготовления на основе геометрической информации об изделии [1].

Применительно к аддитивным технологиям исходной геометрической информацией для изготовления является триангуляционная 3D модель промышленного изделия [2, 16]. Триангуляционная модель унифицирует представление о поверхности изделия, что создает предпосылки для анализа системы треугольных граней. Анализ 3D модели должен представлять собой определение безразмерных показателей, позволяющих оптимизировать процесс изготовления (для заданных показателей качества, объема выпуска, условий выполнения работ и оборудования) [3, 4, 16].

Практика показывает существенную роль технологической подготовки к выбору и эффективной реализации стратегии изготовления изделий (особенно со сложной формой поверхностей). Общая схема разработки технологического процесса представлена на рис. 1 [5]. Основными задачами технологической подготовки изготовления изделий аддитивными технологиями являются [6]: выбор метода изготовления и материала изделия, отработка конструкции на технологичность, определение стратегии изготовления, структурная обратимая декомпозиция, рациональная ориентация изделия на рабочей платформе, масштабирование триангуляционных моделей (технологическая компенсация усадки материала), создание поддерживающих структур (например, для способов SLA и FDM), выбор стратегии нарезки модели для создания набора сечений, задание параметров формообразования слоев и пост-обработки, и т. д.

Рис. 1 – Схема разработки технологического процесса изготовления изделий аддитивными технологиями

В общем задачи технологической подготовки изготовления изделий аддитивными технологиями являются не только отдельными, но и взаимосвязанными. Эта взаимосвязь проявляется в разных аспектах изготавливаемых изделий, которые возникают от общих ограничивающих факторов [6]. Поэтому следует выполнять весь комплекс задач на основе единых критериев технологичности конструкции изделия.

При использовании аддитивных технологий, как и традиционных технологий, присутствует прямая причинно-следственная связь между сложностью конструкции и себестоимостью изделия [7].

В известных работах [8-11] определение технологичности конструкции ограничено использованием показателей, характеризующих геометрическую сложность изделия. Это притом, что определение понятия "сложность" для изделия, получаемого аддитивными технологиями, включает несколько состав-

© Я.Н. Гаращенко, 2017

ляющих [12]: геометрическая сложность, сложность структуры материалов, иерархическая и функциональная сложности. Поэтому существующие показатели не являются достаточно представительными для последующего принятия решений на этапе технологической подготовки.

В данной работе предлагается набор показателей сложности конструкции изделия с учетом всех составляющих понятия "сложность", отображающие специфические особенности аддитивных технологий. Расширение набора показателей позволит научно обоснованно осуществлять выбор стратегии изготовления изделия на этапе технологической подготовки.

Целью работы – разработка комплекса показателей для оценки технологичности конструкции изделия, изготавливаемого аддитивными технологиями. При этом показатели технологичности конструкции определяются на основе анализа исходной триангуляционной 3D модели изделия.

Особенности оценки технологичности конструкции изделия.

Технологическая подготовка, применительно к аддитивным технологиям, тесно связана с конструкторской подготовкой (см. рис. 1), которая включает следующие задачи [5]:

- адаптация требований конструкции изделия к технологическим возможностям аддитивных технологий;
- отработка технологичности конструкции изделия (ТКИ) с учетом конструкторских и технологических ограничений;
- топологическая оптимизация конструкции.

На втором этапе изучаются факторы, определяющие возможности и ограничения аддитивных технологий. Например: размеры и объем рабочего пространства установки, доступные материалы для выбранного метода изготовления, механические свойства материала, минимально допустимый размер элемента конструкции, время и себестоимость построения и т.д.

На последнем - третьем этапе реализуются преимущества аддитивных технологий в создании сложных геометрических форм для совершенствования конструкции изделия. Но следует учитывать технологические ограничения по геометрической сложности изделия, особенности его ориентации, послойного формирования изделия и поддерживающих структур для «свисающих» поверхностей.

Выполняемая при отработке ТКИ оценка технологичности, подразумевает комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих задачи с последовательным выявлением ТКИ в целом или отдельных рассматриваемых ее свойств и представление результатов в форме, приемлемой для принятия управленческих решений по совершенствованию конструкции изделия и технологии его изготовления [4].

Процесс определения показателей ТКИ реализуется в следующей последовательности: анализ триангуляционной модели с получением исходных данных для анализа; обработка результатов анализа; выбор номенклатуры показателей; определение показателей. Число показателей принимается минимальным, но достаточным для объективной оценки технологичности.

Для аддитивных технологий, в отличие от традиционных, характерна несущественная связь показателей технологичности конструкции с видом изделия. При оценке показателей ТКИ следует их рассматривать относительно базовых значений, в качестве которых принимаются величины, характерные (нормативные) для заданного оборудования. Представляет интерес создание базы данных оборудования аддитивных технологий с достигнутыми показателями технологичности для обоснованного определения нормативных значений.

Достигнутые показатели ТКИ для каждой стадии создания изделия используются для сравнительного анализа, а также для определения уровня ТКИ:

$$K_L = K_i / K_{Norm} ,$$

где K_i, K_{Norm} – достигнутый и нормативный показатель технологичности конструкции соответственно.

Классификация показателей, созданная с учетом особенностей оценки, ТКИ для аддитивных технологий представлена на рис. 2.

Рис. 2 – Классификация показателей технологичности конструкции изделия

Показатели сложности конструкции изделия.

Основными факторами, влияющими на обеспечение технологичности при отработке конструкции изделия, являются его сложность и ограничения выбранной технологии (с учетом условий производства). Поэтому необходимо определение показателей сложности изделия для обоснованного выбора нормативного показателя ТКИ.

Конструкцию изделия характеризуют в общем случае материал, состав и взаимное расположение его составных частей, структурное исполнение, форма и относительное расположение поверхностей с их шероховатостью и размерами [4].

Аддитивные технологии имеют огромный потенциал по сложности создаваемой конструкции, предлагая свободу в создании геометрических форм

поверхностей, но такой потенциал не является неограниченным. Ограничения возникают из-за технологического принципа послойного построения, материала изделия или используемого оборудования [13].

Понятие "сложность" применительно к изделиям, получаемым аддитивными технологиями, включает составляющие [12], которые следует оценивать отдельными показателями:

K_G – геометрическая сложность, которая характеризуется топологической сложностью [7], поверхностями сложной формы, криволинейными ограничивающими контурами, разнообразием взаимного расположения поверхностей и их размеров;

K_S – сложность структуры материалов, которая характеризуется пространственным расположением составляющих частиц или слоев материала;

K_H – иерархическая сложность, которая характеризуется использованием иерархических многомерных структур (с элементами, подэлементами и т.д.);

K_F – функциональная сложность, которая характеризуется непосредственным изготовлением функциональных кинематических устройств в собранном виде.

Показатель геометрической сложности K_G напрямую определяет трудоемкость изделия на этапах технической подготовки производства и изготовления. Данный показатель предлагается определять на основе анализа влияния параметров триангуляции CAD-модели (максимально допустимых значений погрешности Δ_{max}, размера ребра l_{max} или двугранного угла между смежными гранями φ_{max}) на количество граней триангуляционной модели изделия N_{Face} [14]. Результатом анализа являются коэффициенты уравнений регрессий:

$$\frac{N_{Face}}{N_{Face0}} = a\left(\frac{\Delta_{max0}}{\Delta_{max}}\right)^2 + b\frac{\Delta_{max0}}{\Delta_{max}} + c\,, \qquad (1)$$

$$\frac{N_{Face}}{N_{Face0}} = \left(\frac{l_{max0}}{l_{max}}\right)^d, \qquad (2)$$

$$\frac{N_{Face}}{N_{Face0}} = a\left(\frac{\varphi_{max0}}{\varphi_{max}}\right)^2 + b\frac{\varphi_{max0}}{\varphi_{max}} + c\,, \qquad (3)$$

где Δ_{max0}, l_{max0}, φ_{max0}, N_{Face0} – параметры триангуляции CAD-модели изделия и количество граней модели, принятой в качестве базовой – наиболее точной из исследуемого ряда триангуляционных моделей.

По результатам исследования моделей [14] выявлено, что значения коэффициентов уравнений (1) и (3) можно ассоциировать с относительным количеством треугольных граней, принадлежащих отдельным видам поверхностей: a – криволинейной поверхности вращения; b – линейчатой поверхности вращения и плоской с криволинейным контуром; c – плоской с прямолинейным контуром (количество граней не изменяется от параметра триангуляции Δ_{max} или φ_{max}). Коэффициент d уравнения (2) может характеризовать степень сложности модели по длине периметра криволинейных контуров поверхностей. Например, для сферы, не имеющей ограничивающих контуров, коэффициент $d = 2$. С увеличением периметра криволинейных контуров в тестовых моделях изделий коэффициент d уменьшается.

С учетом особенностей послойного построения более технологичная конструкция изделия будет содержать больше плоских и цилиндрических поверхностей с меньшим периметром криволинейных контуров. Следовательно, показатель геометрической сложности необходимо определять по следующей зависимости:

$$K_G = d\left(b + c\right)/2\,,$$

где b, c – коэффициенты уравнения регрессии (1) или (3);

d – коэффициент уравнения регрессии (2).

Следует также учитывать, что геометрическая сложность ограничивается минимально допустимыми значениями радиуса кривизны поверхности, толщины стенок и размеров элементов конструкции.

В качестве дополнительных частных показателей геометрической сложности изделия следует рассматривать показатели, определяемые особенностями решения отдельных задач технологической подготовки. Наиболее существенно влияющими на эффективность создания изделия являются задачи: структурная обратимая декомпозиция, рациональная ориентация и размещение изделий на рабочей платформе установки [10].

В качестве показателя структурной обратимой декомпозиции принимаем коэффициент, характеризующий возможность размещения изделия на рабочей платформе установки:

$$K_{GD} = \begin{cases} \dfrac{L_{max}}{L_{W\,max}}, & \text{если } L_{min} \le L_{Wmin} \text{ и } L_{mean} \le L_{Wmean} \\ \dfrac{L_{max}L_{mean}}{L_{W\,max}L_{Wmean}} & \text{если } L_{min} \le L_{Wmin} \text{ и } L_{mean} > L_{Wmean} \\ \dfrac{V_{Box}}{V_W}, & \text{если } L_{min} > L_{Wmin} \text{ и } L_{mean} > L_{Wmean} \end{cases},$$

где L_{min}, L_{mean}, L_{max} – минимальный, средний и максимальный габаритный размер изделия соответственно;

L_{Wmin}, L_{Wmean}, L_{Wmax}, V_W – минимальный, средний, максимальный размер и объем рабочего пространства установки соответственно;

V_{Box} – объем параллелепипеда, описывающий изделие.

При коэффициенте $K_{GD} > 1$ требуется обратимая структурная декомпозиция изделия для размещения его частей в рабочем пространстве установки. Величина K_{GD} приблизительно соответствует необходимому количеству загрузок установки для создания изделия по частям при условии низкой эффективности решения задачи по их декомпозиции.

Коэффициент прогнозируемой эффективности декомпозиции изделия:

$$K_{GDE} = 1 - V_{Part}/V_{Box}\,,$$

где V_{Part} – объем изделия.

Величина коэффициента $K_{GDE} > 0.7$ будет указывать на потребность и потенциальную эффективность

использования обратимой структурной декомпозиции изделия.

Сложность решения задачи рациональной ориентации связана с большим количеством ограничивающих факторов [5, 6, 8]. Основной информацией для определения рациональной ориентации изделия являются коэффициенты единичных векторов для нормалей граней триангуляционной модели изделия.

Неравномерное распределение углов наклона нормалей граней является характерным признаком для моделей изделий, которые имеют более простое решение задачи по их рациональной ориентации. Примерами, подтверждающими такое предположение, могут служить модели сферы и цилиндра вращения. Сфера имеет равномерное распределение углов наклона нормалей, при этом задача рациональной ориентации изделия не имеет решения. Цилиндр вращения имеет равномерное распределение углов наклона нормалей только в одной плоскости. Для цилиндра такая задача имеет решение с точным определением углов наклона модели для ориентации оси цилиндра параллельно оси Z (вектору направления построения).

Равномерность распределения наклона нормалей граней предпочтительно рассматривать в сферической системе координат.

Переход от коэффициентов N_X, N_Y, N_Z единичного вектора нормали грани к углам θ, φ в сферической системе координат выполняется по зависимостям [15]:

$$\theta = arctg\left(\frac{\sqrt{N_X^2 + N_Y^2}}{N_Z}\right),\ \varphi = arctg\left(\frac{N_Y}{N_X}\right).$$

Показателем эффективности рациональной ориентации изделия может служить коэффициент концентрации плотности распределения углов наклона нормалей треугольных граней модели (θ и φ в сферической системе координат):

$$K_{GO} = \frac{1}{2}\sum_{i,j}^{n,m}\left|D_{ij} - d_{ij}\right|, \qquad (4)$$

где n, m – число интервалов для углов $\theta \in [0, 180]$ и $\varphi \in [0, 360]$ наклона нормалей треугольных граней модели соответственно (рекомендуемое значение $n = 4 \div 6$, $m = 2n$);

D_{ij}, d_{ij} – относительная площадь граней, попадающих в ij-ю область значений углов θ и φ наклона нормалей для модели изделия и сферы соответственно, $d_{ij} = 1/(n\,m)$;

Модель сферы по зависимости (4) будет иметь коэффициент $K_{GO} = 0$, в данном случае задача рациональной ориентации изделия не имеет решения. Получение сравнительно большего по величине коэффициента K_{GO} будет указывать на возможность определения меньших по размеру области значений углов θ, φ наклона изделия для рациональной его ориентации.

Показателем рационального размещения изделий на рабочей платформе установки принимаем коэффициент, характеризующий эффективность использования объема рабочего пространства:

$$K_{GP} = V_{Part} / S_W H_{Load},$$

где S_W – площадь рабочей платформы установки;

H_{Load} – высота изделий (по направлению построения), размещенных на рабочей платформе.

Задача эффективного использования объема рабочего пространства является актуальной для большинства методов изготовления аддитивными технологиями.

Сложность структуры материалов определяется количеством компонентов материала n_M и характером их распределения в объеме изделия. В качестве степени сложности характера распределения можно принять число координатных осей n_P, по которым распределяются структурные элементы материала. Для послойного расположения структурных элементов – $n_P = 1$, для построчного – $n_P = 2$ и поточечного – $n_P = 3$.

Показатель сложности структуры материалов K_S следует определять по следующей зависимости:

$$K_S = 1/n_M n_P,$$

где n_M – число компонентов материала;

n_P – число координатных осей распределения структурных элементов материала в объеме изделия.

Сложность структуры ограничивается технологическими возможностями установки по количеству используемых материалов, минимальными размерами структурных элементов и их размещением в рабочем пространстве.

Показатель иерархической сложности K_H определяется числом уровней структур n_S в изделии:

$$K_H = 1/n_S.$$

Основным ограничением для иерархической сложности являются минимально допустимые размеры элементов и возможность освобождения пустотелых замкнутых объемов изделия от неиспользованного исходного материала (для методов изготовления SLA, SLS и SLM).

Дополнительным показателем иерархической сложности изделия является коэффициент геометрической сложности иерархической структуры:

$$K_{HG} = 1 - \frac{N_{FaceInner}}{N_{Face}},$$

где N_{Face}, $N_{FaceInner}$ – количество граней для триангуляционной модели и для внутренних оболочек соответственно.

Если в наличии имеется только одна оболочка для модели изделия (т.е. модель не имеет внутренних структур), тогда $N_{FaceInner} = 0$ и соответственно коэффициент $K_{HG} = 1$.

Основные проблемы для создания функциональных изделий непосредственным построением аддитивными технологиями связаны с формообразованием контактирующих и замкнутых внутренних поверхностей. Формообразование поверхностей с минимальным зазором между частями изделия ухудшает их качество и затрудняет доступ к ним для постобработ-

ки. Увеличение площади таких поверхностей будет приводить к снижению технологичности изделия.

Показатель функциональной сложности K_F следует определять по следующей зависимости:

$$K_F = 1 - \frac{S_{Contact} + S_{Inside}}{S_{Part}},$$

где $S_{Contact}$ – суммарная площадь треугольных граней поверхностей с минимально допустимым зазором между частями изделия;

S_{Inside} – суммарная площадь треугольных граней внутренних поверхностей, требующих постобработки;

S_{Part} – суммарная площадь треугольных граней модели изделия.

Функциональная сложность ограничивается минимально допустимым зазором между частями изделия, обеспечением доступа к поверхностям, требующим постобработки и необходимостью освобождения замкнутых объемов, образовавшихся между частями изделия, от неиспользованного исходного материала.

Основными критериями эффективности конструкторской подготовки производства являются увеличение показателей сложности изделия и относительное уменьшение объема используемого материала в изделии:

$$K_V = V_{Part} / V_{Part0},$$

где V_{Part0}, V_{Part} – объем изделия первоначально заданной конструкции и после конструкторской подготовки соответственно.

Основные показатели технологичности конструкции изделия.

Основные показатели ТКИ характеризуют наиболее важные свойства изделия и позволяют оценивать технологичность в целом.

В состав работ по обеспечению ТКИ на этапе изготовления входят мероприятия по снижению трудоемкости, материалоемкости, энергоемкости и технологической себестоимости изделия [3, 4].

Показатель трудоемкости изделия.

Трудоемкость изделия как показатель ТКИ характеризует количество труда, затрачиваемого на одно изделие с учетом его конструктивных особенностей [4].

Технологическое время создания изделия для большинства способов изготовления аддитивными технологиями определяется по зависимости:

$$T_{Build} = \sum_{i=1}^{n_{Load}} \frac{T_{Home} + T_{Add} + T_{Work} + T_{End}}{N_{Load}}, \qquad (5)$$

где T_{Home} – подготовительные операции;

T_{Add} – послойное построение дополнительных технологических элементов;

T_{Work} – послойное формообразование изделий;

T_{End} – заключительные операции;

N_{Load} – количество создаваемых изделий;

n_{Load} – количество многократных загрузок установки при изготовлении изделия разбитого на части с использованием принципа обратимой структурной декомпозиции.

Составляющая T_{Work} в зависимости (5) является наибольшей. Время на послойное формообразование T_{Work} зависит от достаточно большого набора технологических параметров, но в основном — от высоты изделий (по направлению построения), размещенных на рабочей платформе H_{Load} и толщины слоев h_{Layer}.

Технологическое время T_{Build} существенно зависит от сложности изделия [7, 14], поэтому следует учитывать предложенные показатели сложности при сравнительной оценке трудоемкости изготовления для различных изделий.

Удельным показателем трудоемкости принято технологическое время изготовления, приходящееся на единицу объема изделия:

$$K_T = T_{Build} / V_{Part}.$$

Число слоев построения изделия определяется отношением высоты изделий H_{Load} к толщине слоев h_{Layer} (для стратегии нарезки модели с постоянным шагом). Учитывая наиболее существенное влияние этих параметров на время построения T_{Work} в качестве дополнительного показателя следует определять следующий коэффициент:

$$K_{GLE} = n_{L(min)} / n_L,$$

где n_L – число слоев построения изделия для заданной стратегии нарезки модели;

n_{Lmin} – минимально возможное число слоев для изделия с учетом технологических возможностей оборудования, $n_{Lmin} = L_{min} / h_{L\max}$;

L_{min} – минимальный габаритный размер изделия;

$h_{L\max}$ – максимально допустимая толщина слоя.

Коэффициент K_{GLE} можно использовать как критерий эффективности стратегии послойного построения изделия.

Показатель материалоемкости изделия.

Материалоемкость изделия, как показатель ТКИ, характеризует количество материальных ресурсов, необходимых для создания и применения одного изделия с учетом его конструктивных особенностей [4].

Оценка материалоемкости в сфере производства выполняется с учетом технологических особенностей выбранного метода изготовления. Для определения объема использованного материала на изготовление изделия аддитивными технологиями следует учитывать такие составляющие: объем поддерживающих структур $V_{support}$ (для SLA и FDM), объем неиспользованного исходного материала V_{unused} (для SLS, SLM и LOM), объем внутренних структур V_{l_str} (lattice structure – решетчатые структуры, общая особенность аддитивных технологий по снижению материалоемкости).

Объем исходного материала, используемого на создание изделия, определяется по следующей зависимости:

$$V_M = K_{Shrink} V_{Part} + K_S V_{Support} + (1 - K_U) V_{Unused} - K_L V_{L_str},$$

где V_{part}, $V_{support}$, V_{unused}, V_{l_str} – объемы исходной модели изделия, поддерживающих структур, неиспользованного материала и внутренних структур;

K_{Shrink} – объемный коэффициент усадки материала;

K_S, K_L – коэффициенты относительного заполнения материалом объема поддерживающих и решетчатых структур соответственно, K_L и $K_S \in [0, 1]$;

K_U – коэффициент последующего использования нереализованного исходного материала, $K_U \in [0, 1]$.

Дополнительно к абсолютным значениям материалоемкости изделия в качестве показателя технологичности следует использовать удельную материалоемкость:

$$K_M = V_{Part} / V_M .$$

Показатель энергоемкости изделия.

Энергоемкость изделия, как показатель ТКИ, характеризует количество энергетических ресурсов, необходимых для создания одного изделия [4]. Энергоемкость определяется по ее удельным составляющим [7]:

$$E_{Build} = E_{Star-up} + e_{Time} T_{Build} + e_{Layer} l + e_V V_{Part} + E_{Shutdown} ,$$

где $E_{Start\text{-}up}$, $E_{Shutdown}$ – затраты энергии для выполнения процедур на установке до формообразования и после него соответственно; e_{Time}, e_{Layer}, e_V – удельные энергоемкости для времени построения T_{Build}, количества слоев l и объема изделия V_{Part}.

Дополнительный безразмерный показатель – удельная энергоемкость изделия:

$$K_E = E_{Build} / V_{Part} .$$

Показатель технологической себестоимости изделия.

Технологическая себестоимость изделия, как показатель ТКИ, характеризует в стоимостном выражении ресурсоемкость изделия [3, 4]. На этапе изготовления определяется по зависимости:

$$C_{Build} = T_{Build} c_T + V_M \rho_M c_M + E_{Build} c_E ,$$

где c_T, c_M, c_E – удельные составляющие себестоимости для технологического времени изготовления T_{Build}, массы материала $V_M \rho_M$ и затраченной энергии E_{Build} соответственно;

ρ_M – удельная плотность материала изделия.

Уровень технологичности K_L определяется по одному или нескольким частным и комплексным показателям, принятым в качестве критериев оценки технологичности конструкции [3, 4]. Допустимые пределы значений K_L определяются опытным путем применительно к конкретным производственным условиям.

Выводы. Оценку технологичности конструкции изделия, изготавливаемого аддитивными технологиями, необходимо выполнять на основе анализа триангуляционной 3D модели по составляющим сложности изделия: геометрической сложности, сложности структуры материалов, иерархической и функциональной сложностей. Предложенные показатели сложности изделия обеспечивают научно-обоснованную оценку соответствия конструкторских требований выбору стратегии изготовления.

Необходима дальнейшая разработка комплексов показателей для решения задач технологической подготовки по оптимизации параметров послойного формообразования и постобработки изделий.

Список літератури

1 *Satyandra K G. W., Das D., & Nau D. S.* Automated Manufacturability Analysis: A Survey. Research in Engineering Design, 1997, pp. 168-190. - DOI: 10.1007/BF01596601.

2 *Gibson I., Rosen D. W., Stucker B.* Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer Verlag, New York. - 2010. - 473 p. - ISBN: 978-1-4419-1119-3. – DOI: 10.1007/978-1-4419-1120-9.

3 *Медведева С. А.* Основы технической подготовки производства / Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 69 с.

4 Технологичность конструкции изделия: Справочник / *Ю. Д. Амиров, Т. К. Алферова, П. Н. Волков и др.*; Под общ. ред. *Ю. Д. Амирова*. - М.: Машиностроение, 1990. - 768 с.

5 *Zhanga Y., Bernarda A., Kumar Guptab R., Harik R.* Evaluating the design for additive manufacturing: a process planning perspective. Procedia CIRP, 21, 2014. pp. 144-150. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.179.

6 *Kulkarni P., Marsan A. and Dutta D.* A Review of Process Planning Techniques in Layered Manufacturing // Rapid Prototyping Journal, 6(1), 2000, pp. 18-35, DOI: 10.1108/13552540010309859.

7 *Baumers M.* Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption. A Doctoral Thesis. Submitted in partial fullment of the requirements for the award of Doctor of Philosophy of Loughborough University. 2012 - 266 p. - https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10768.

8 *Gupta S. K., Das D., Regli W. C; Nau D. S.* Automated manufacturability analysis: A survey, Research in Engineering Design, 9(3), 1997. pp. 168-190. DOI: 10.1007/BF01596601.

9 *Belaziz M., Bouras A., Brun J. M.*. Morphological analysis for product design, Computer-Aided Design, Volume 32, Issues 5–6, 2000. pp. 377-388, ISSN 0010-4485. DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00019-1.

10 *Абдурайимов Л. Н.* Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий путем морфологического анализа их 3D образа на этапе подготовки к материализации: Дис. канд... техн. наук: 05.02.08. - Харьков: НТУ "Харк. пол. ин-т.", 2012. - 264 с.

11 *Kerbrat O., Mognol P., Hascoet J.-Y.* A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing, Computers in Industry, Elsevier, vol. 62 (7), 2011. - pp. 684-692. DOI: 10.1016/j.compind.2011.04.003.

12 *David W. Rosen.* What are Principles for Design for Additive Manufacturing? 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2014). 26-28 May 2014, Singapore. DOI: 10.3850/978-981-09-0446-3_027.

13 *Kumke M., Watschke H., Vietor T.* A new methodological framework for design for additive manufacturing. Virtual And Physical Prototyping. Vol. 11, Iss. 1, 2016, pp. 3-19. DOI: 10.1080/17452759.2016.1139377.

14 *Доброскок В., Гаращенко Я.* Оценка геометрической сложности изделий на основе анализа зависимости количества граней триангуляционных моделей от допустимого двугранного угла между смежными гранями // Българско списание за инженерно проектиране. Издател: Машиностроителен факултет, Технически университет-София, 2017 (31). - С. 63-71. ISSN 1313-7530. – Режим доступу: http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0031(2017).pdf. – Дата звертання: 20 лютого 2017.

15 *Выгодский М. Я.* Справочник по высшей математике / *М. Я. Выгодский*. - М.: АСТ: Астрель, 2006. - 991 с.

16 *Левченко Д.А.* Применение технологии 3D печати при проектировании и прототипировании компрессорной техники [Текст] / Д.А. Левченко, В.А. Иванов, С.О. Шарапов [и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2014. – № 4 (38). – С. 27–33.

References (transliterated)

1 Satyandra K G. W., Das D., & Nau D. S. Automated Manufacturability Analysis: A Survey. *Research in Engineering Design*, 1997, pp. 168-190. - DOI: 10.1007/BF01596601.

2 Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer Verlag, New York. - 2010. - 473 p. - ISBN: 978-1-4419-1119-3. – DOI: 10.1007/978-1-4419-1120-9.

3 Medvedeva S. A. *Osnovy tehnicheskoj podgotovki proizvodstva* [Basics of design for manufacturing] / Uchebnoe posobie. – St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2010, 69 p.

4 *Tehnologichnost' konstrukcii izdelija: Spravochnik* [The manufacturability of product design: Handbook] / Ju. D. Amirov, T. K.

Alferova, P. N. Volkov i dr.; Pod obshh. red. Ju. D. Amirova. - Moscow: Mashinostroenie, 1990. - 768 s.
5 Zhanga Y., Bernarda A., Kumar Guptab R., Harik R. Evaluating the design for additive manufacturing: a process planning perspective. *Procedia CIRP*, 21, 2014. pp. 144-150. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.179.
6 Kulkarni P., Marsan A. and Dutta D. A Review of Process Planning Techniques in Layered Manufacturing // *Rapid Prototyping Journal*, 6(1), 2000, pp. 18-35, DOI: 10.1108/13552540010309859.
7 Baumers M. *Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption. A Doctoral Thesis*. Submitted in partial fullment of the requirements for the award of Doctor of Philosophy of Loughborough University. 2012 - 266 p. - https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10768.
8 Gupta S. K., Das D., Regli W. C; Nau D. S. Automated manufacturability analysis: A survey, *Research in Engineering Design*, 9(3), 1997. pp. 168-190. DOI: 10.1007/BF01596601.
9 Belaziz M., Bouras A., Brun J. M.. Morphological analysis for product design, *Computer-Aided Design*, Volume 32, Issues 5–6, 2000. pp. 377-388, ISSN 0010-4485. DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00019-1.
10 Abdurajimov L. N. *Povyshenie jeffektivnosti integrirovannyh tehnologij poslojnogo vyrashhivanija izdelij putem morfologicheskogo analiza ih 3D obraza na jetape podgotovki k materializacii: Dis. kand... tehn. nauk: 05.02.08.* [The efficiency increase of computer-integrated technologies of the parts layer growth on the morphological analysis of 3D image in preparation for materialization. Eng. sci. diss.]. Kharkov: NTU "Hark. pol. in-t.", 2012. - 264 p.
11 Kerbrat O., Mognol P., Hascoet J.-Y. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing, *Computers in Industry*, Elsevier, vol. 62 (7), 2011. - pp. 684-692. DOI: 10.1016/j.compind.2011.04.003.
12 David W. Rosen. What are Principles for Design for Additive Manufacturing? *1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing* (Pro-AM 2014). 26-28 May 2014, Singapore. DOI: 10.3850/978-981-09-0446-3_027.
13 Kumke M., Watschke H., Vietor T. A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual And Physical Prototyping*. Vol. 11, Iss. 1, 2016, pp. 3-19. DOI: 10.1080/17452759.2016.1139377.
14 Dobroskok V., Garashchenko Ya. Otsenka geometricheskoy slozhnosti izdeliy na osnove analiza zavisimosti kolichestva graney triangulyatsionnykh modeley ot dopustimogo dvugrannogo ugla mezhdu smezhnymi granyami [Evaluating the geometrical complexity of products based on regression analysis between number of faces of triangulated models and allowable dihedral angle for adjacent faces] // *B"lgarsko spisanie za inzhenerno proektirane*. Izdatel: Mashinostroitelen fakultet, Tekhnicheski universitet-Sofiya, 2017 (31). - pp. 63-71. ISSN 1313-7530. Available at: http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0031(2017).pdf. (accessed 20.02.2017)
15 Vygodskij M. Ja. *Spravochnik po vysshej matematike* [Handbook of higher mathematics]. - Moscow: AST: Astrel, 2006. - 991 p.
16. Levchenko D.A., Ivanov V.A., Sharapov S.O. etc. Primenenie tehnologii 3D pechati pri proektirovanii i prototipirovanii kompressornoy tehniki [*Application of 3D printing technology in the design and design of the equipment*]. Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie. 2014. No4(38). Pp 27-33.

Поступила (received) 03.04.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оцінка технологічності конструкції виробів, одержуваних за допомогою адитивних технологій / Я. М. Гаращенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 44–50. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-004X.

Оценка технологичности конструкции изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий / Я. Н. Гаращенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 44–50. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-004X**.**

Manufacturability evaluation of industrial products manufactured by additive technologies / Ya. Garashchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P. 44–50. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гаращенко Ярослав Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри "Інтегровані технології машинобудування", Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-067-189-20-05; e-mail: yaroslav.garashchenko@gmail.com.

Гаращенко Ярослав Николаевич – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры "Интегрированные технологии машиностроения", Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: +38-067-189-20-05; e-mail: yaroslav.garashchenko@gmail.com.

Yaroslav Garashchenko – Candidate of Technical Sciences, Docent, Doctoral candidate, Department of "Integrated technologies of mechanical engineering", National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv; el.: +38-067-189-20-05; e-mail: yaroslav.garashchenko@gmail.com

УДК 621.923

О. С. КЛЕНОВ

УПРОЩЕННЫЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИТИЧЕСКОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

В роботі наведено отримані спрощені аналітичні залежності для визначення температури різання при шліфуванні й лезовій обробці. Показано, що основна частка тепла, що утворюється при шліфуванні, йде в оброблювану деталь, а при лезовій обробці, навпаки, фактично все тепло йде в стружки, що утворюються, внаслідок збільшеної продуктивності обробки. При цьому температура різання при шліфуванні більше, ніж при лезовій обробці в зв'язку зі збільшеним умовним напруженням різання, обумовленим інтенсивним тертям зв'язки круга з оброблюваним матеріалом і наявністю негативних передніх кутів на різальних зернах. Тому основною умовою зменшення температури різання є зменшення умовного напруження різання.

Ключові слова: температура різання, шліфування, лезова обробка, умовне напруження різання, продуктивність обробки, якість обробки, сила різання, адіабатичний стержень.

В работе приведены полученные упрощенные аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке. Показано, что основная доля тепла, образующегося при шлифовании, уходит в обрабатываемую деталь, а при лезвийной обработке, наоборот, фактически все тепло уходит в образующиеся стружки вследствие увеличенной производительности обработки. При этом температура резания при шлифовании больше, чем при лезвийной обработке в связи с увеличенным условным напряжением резания, обусловленным интенсивным трением связки круга с обрабатываемым материалом и наличием отрицательных передних углов на режущих зернах. Поэтому основным условием уменьшения температуры резания является уменьшение условного напряжения резания.

Ключевые слова: температура резания, шлифование, лезвийная обработка, условное напряжение резания, производительность обработки, качество обработки, сила резания, адиабатический стержень.

The paper presents simplified analytical dependencies for determination of the cutting temperature during grinding and blade machining. It is shown that the main part of the heat generated during grinding leaves in the workpiece, and in the case of blade processing, on the contrary, virtually all the heat goes to the resulting chips because of the increased processing capacity. At the same time, the cutting temperature during grinding is greater than in the case of blade cutting due to the increased nominal cutting stress due to the intense friction of the wheel bundle with the material being processed and the presence of negative front corners on the cutting grains. Therefore, the main condition for reducing the cutting temperature is a reduction in the nominal cutting voltage.

Key words: Cutting temperature, grinding, blade processing, conditional cutting voltage, processing capacity, machining quality, cutting force, adiabatic rod.

Постановка проблемы. Шлифование является одним из основных методов финишной обработки деталей машин, обеспечивающим высокое качество и точность обрабатываемых поверхностей. Однако процесс шлифования характеризуется относительно низкой производительностью обработки в связи с возможностью образования на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. Поэтому в ряде случаев вместо шлифования применяют финишную лезвийную обработку, обеспечивающую более высокие показатели качества обрабатываемых поверхностей. В связи с этим проблема повышения производительности обработки при шлифовании с учетом ограничения по температуре резания является актуальной, направленной на интенсификацию машиностроительного производства. Этому вопросу в научно-технической литературе уделяется большое внимание: разработаны эффективные технологические процессы шлифования, позволяющие добиться существенного повышения производительности при обеспечении высокого качества обработки. Вместе с тем, полученные решения носят, как правило, частный характер, поскольку основаны на результатах экспериментальных исследований для вполне конкретных случаев обработки без проведения глубокого теоретического анализа физической сущности тепловых процессов, протекающих при шлифовании.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время получены фундаментальные теплофизические решения применительно к процессам шлифования [1-4], однако они достаточно сложны для практического применения. Это требует разработки новых теоретических решений, позволяющих достаточно просто подойти к определению температуры резания при шлифовании и обосновать оптимальные условия обработки, обеспечивающие максимально возможную производительность и высокое качество обрабатываемых поверхностей. Учитывая сказанное, в работе [5] предложен достаточно простой и эффективный теоретический подход к определению температуры резания при шлифовании, учитывающий баланс тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь. Суть подхода состоит в том, что снимаемый припуск представлен набором бесконечно тонких прямолинейных адиабатических стержней, которые расположены перпендикулярно движению шлифовального круга (рис. 1) и перерезаются в процессе шлифования. Этот теоретический подход является дальнейшим развитием подхода, предложенного профессором Якимовым А.В. [2], согласно которому процесс перерезания адиабатических стержней не рассматривается, а распределение тепла, образующегося при шлифовании, учитывается поправочным коэффициентом, установленным экспериментальным путем. В предлагаемом подходе [5] (в результате учета перерезания адиабатических стержней шлифовальным кругом) рассматривается движение теплового источника вдоль адиабатического стержня, что позволяет автоматически учитывать образующееся при шлифовании тепло, уходящее в стружки и обрабатываемую деталь, соответственно приблизить теорию и практику шлифования и научно обоснованно подойти

© О.С. Кленов, 2017

к определению температуры резания как при шлифовании, так и при лезвийной обработке.

Цель работы – аналитическое определение температуры резания при шлифовании, ее сравнение с температурой резания при продольном точении и обоснование наиболее эффективных направлений уменьшения температуры резания при механической обработке.

Основной материал. В работе [5] приведено уравнение для определения температуры резания при плоском шлифовании, согласно которому шлифовальный круг вращается со скоростью $V_{кр}$, а обрабатываемая деталь перемещается в горизонтальном направлении со скоростью $V_{дет}$ (рис. 1):

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \left(1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2}{\lambda} \cdot \tau - \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta} \right), \qquad (1)$$

где σ – условное напряжение резания, Н/м^2;

λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;

c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м^3;

τ – время контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем, равное времени его перерезания шлифовальным кругом, с;

$V_{рез}$ – скорость перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом, м/с.

Исходя из рис. 1, за время перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом на глубину l_1 образующееся при шлифовании тепло переместилось вдоль адиабатического стержня на глубину l_2.

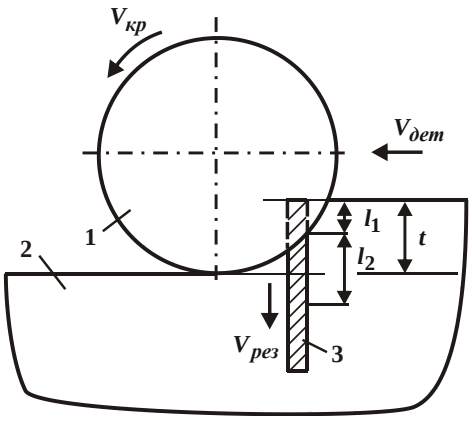


Рис. 1 – Расчетная схема параметров теплового процесса при плоском шлифовании: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатический стержень.

Наибольшая температура достигается в точке контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем, а наименьшая, равная нулю, - на расстоянии l_2 от этой точки. Поэтому в качестве искомой температуры резания θ рассматривается температура в точке контакта шлифовального круга с адиабатическим стержнем.

Для удобства решения уравнения (1) его необходимо представить в виде:

$$(1 - x) \cdot e^x = e^{-\alpha}, \qquad (2)$$

где $x = \frac{c \cdot \rho}{\sigma} \cdot \theta$ – безразмерная величина;

$\alpha = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau$ – безразмерная величина.

Задавая значения α, несложно методом подбора определить значения x (табл. 1), а соответственно и температуру резания θ.

Как видно, с увеличением величины α значения величины x непрерывно увеличиваются, асимптотически приближаясь к значению 1. По такому же закону изменяется и температура резания $\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot x$.

Уравнение (2) можно упростить, рассматривая разложение экспоненциальной функции в ряд

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \ldots \qquad (3)$$

и пренебрегая слагаемыми, начиная с третьего слагаемого, рассматривая их бесконечно малыми:

$$e^x \approx 1 + x. \qquad (4)$$

Подставляя зависимость (4) в уравнение (2), получено

$$\left(1 - x^2\right) = e^{-\alpha}. \qquad (5)$$

Откуда

$$x = \sqrt{1 - e^{-\alpha}} \qquad (6)$$

или

$$\theta = \sqrt{1 - e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau}}. \qquad (7)$$

В итоге получена простая и удобная для расчетов зависимость. В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (6) значения x. Как видно, с увеличением величины α значения величины x непрерывно увеличиваются, асимптотически приближаясь к значению 1.

Таблица 1

Расчетные значения величины x

α	0,1	0,5	0,7	1	2	3
x по уравнению (2)	0,39	0,7	0,76	0,84	0,95	0,98
$x = \sqrt{1 - e^{-\alpha}}$	0,316	0,628	0,701	0,795	0,93	0,975
Погрешность расчета, %	19,0	10,0	7,8	5,3	2,1	0,5

Однако, значения x меньше аналогичных значений x, установленных на основе уравнения (2) и приведенных в табл. 1. Так, при α =0,1 их расхождение составляет 19 %, а с увеличением величины α это расхождение уменьшается и при α >1 составляет менее 5 %. Это указывает на возможность использования зависимостей (6) и (7), в первом приближении, для определения величины x и температуры резания θ.

Для оценки пределов изменения величины α при плоском шлифовании образца из закаленной стали ШХ15 (коэффициент температуропроводности $\frac{\lambda}{c\cdot\rho}$ =8,4·10^{-6} м^2/с) шлифовальным кругом с радиусом $R_{кр}$ = 0,2 м в табл. 2 и табл. 3 приведены расчетные значения величины α, полученные с учетом соотношений (рис. 1) $\tau=\frac{t}{V_{рез}}$; $V_{рез}=\frac{Q_{уд}}{\sqrt{2\cdot t\cdot R_{кр}}}$; $Q_{уд}=t\cdot V_{дет}$ по преобразованной зависимости

$$\alpha=\frac{c\cdot\rho}{\lambda}\cdot Q_{уд}\cdot\sqrt{\frac{t}{2\cdot R_{кр}}}, \qquad (8)$$

где t – глубина шлифования, м;

$V_{дет}$ – скорость перемещения детали, м/с;

$Q_{уд}$ – удельная производительность обработки, м^2/с.

Как видно, величина α в широком диапазоне изменения удельной производительности обработки $Q_{уд}$ принимает небольшие значения, значительно меньшие единицы. Это указывает на целесообразность использования уравнения (2) для определения температуры резания θ, так как применение зависимости (7) может привести к значительным погрешностям расчета (больше 20 %).

Таблица 2

Расчетные значения величины α при $Q_{уд}$ =400 м^2/с

t, мм	0,01	0,1	1,0	10
α	0,00396	0,0125	0,03986	0,125

Таблица 3

Расчетные значения величины α при $Q_{уд}$ =2000 м^2/с

t, мм	0,01	0,1	1,0	10
α	0,0198	0,0625	0,198	0,626

Сравним зависимость (1) с аналогичной зависимостью, полученной без учета перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом, т.е. без учета перемещения теплового источника вдоль адиабатического стержня (рис. 1) [6]:

$$\theta=\frac{q\cdot l_2}{\lambda}, \qquad (9)$$

где $q=\sigma\cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м^2;

$l_2=\sqrt{\frac{2\cdot\lambda\cdot\tau}{c\cdot\rho}}$ – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м.

В этом случае все образующееся при шлифовании тепло уходит в обрабатываемую деталь. Тогда с учетом соотношения $\tau=t/V_{рез}$ зависимость (9) после преобразований принимает вид:

$$\theta=\frac{\sigma}{c\cdot\rho}\cdot\sqrt{2\cdot\alpha}. \qquad (10)$$

Откуда

$$x=\sqrt{2\cdot\alpha}=\sqrt{\frac{c\cdot\rho\cdot Q_{уд}}{\lambda}\cdot\sqrt{\frac{2\cdot t}{R_{кр}}}}; \qquad (11)$$

$$\theta=\sigma\cdot\sqrt{\frac{Q_{уд}}{c\cdot\rho\cdot\lambda}\cdot\sqrt{\frac{2\cdot t}{R_{кр}}}}. \qquad (12)$$

В табл. 4 приведены рассчитанные по уравнению (2) и зависимости (10) значения величины x. Как видно, при условии α <0,1 (что соответствует практическим данным) расхождение значений x относительно небольшое и составляет до 12,8 %. Поэтому в рассматриваемом диапазоне изменения величины α можно использовать зависимость (10) для определения температуры резания θ с достаточной степенью точности. При этом значения x, рассчитанные по зависимости (10), больше значений x, рассчитанных по уравнению (2), так как в этом случае не учитывается тепло, уходящее в образующиеся стружки, а учитывается лишь тепло, уходящее в обрабатываемую деталь.

Следует отметить также, что значения x, рассчитанные по зависимости (10), могут превышать единицу, тогда как значения x, рассчитанные по уравнению (2), всегда меньше единицы (асимптотически приближаются к единице).

Таким образом показано, что при условии α <0,1 с достаточно высокой степенью точности расчет температуры резания θ можно произвести по упрощенной зависимости (12). Для этого необходимо располагать количественным значением условного напряжения резания σ, которое устанавливается расчетно-экспериментальным путем на основе измерения тангенциальной составляющей силы резания P_z с учетом аналитической зависимости [6]:

Таблица 4

Расчетные значения величины x

α	0,004	0,1	0,5	0,7	1	2
x по уравнению (2)	0,087	0,39	0,7	0,76	0,84	0,95
$x=\sqrt{2\cdot\alpha}$	0,0894	0,447	1,0	1,183	1,414	2,0
Погрешность расчета, %	2,7	12,8	30	38	49	53

$$P_z = \sigma \cdot S_{сум}, \qquad (13)$$

где $S_{сум} = Q / V_{кр}$ – суммарная мгновенная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами шлифовального круга, м^2;

$Q = Q_{уд} \cdot B$ – производительность обработки, м^3/с;

B – ширина шлифования, м;

$V_{кр}$ – скорость круга, м/с.

Из зависимости (12) следует, что добиться уменьшения температуры резания θ при шлифовании можно уменьшением параметров σ, $Q_{уд}$ и t, причем в наибольшей мере за счет уменьшения условного напряжения резания σ, входящего в зависимость (12) с наибольшей степенью.

При заданной удельной производительности обработки $Q_{уд} = t \cdot V_{дет}$ уменьшить температуру резания θ можно уменьшением глубины шлифования t и соответственно увеличением скорости перемещения детали $V_{дет}$, т.е. применением многопроходного шлифования. Уменьшая глубину шлифования t, можно добиться увеличения удельной производительности обработки $Q_{уд}$ при заданной температуре резания θ.

Представляет интерес оценка максимально возможных значений величины α при лезвийной обработке (продольном точении). Для этого в зависимости $\alpha = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau$ скорость перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом $V_{рез}$ необходимо представить зависимостью: $V_{рез} = V \cdot tg\beta$ [5], а время перерезания адиабатического стержня – зависимостью $\tau = a / V_{рез}$, где V – скорость резания, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала; a – толщина среза, м. Тогда

$$\alpha = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V \cdot tg\beta \cdot a. \qquad (14)$$

При продольном точении произведение параметров $V \cdot a = Q_{уд}$, соответственно, производительность обработки $Q = Q_{уд} \cdot в = V \cdot a \cdot в$, где $в$ – ширина среза, м. Поскольку $a \cdot в = S \cdot t$ [6], то $Q = V \cdot S \cdot t$, где S – подача, м/об; t – глубина резания, м.

При шлифовании производительность обработки $Q = V_{дет} \cdot B \cdot t$. Этим показано, что зависимости для определения производительности обработки при продольном точении и шлифовании идентичны, рассматривая $V \approx V_{дет}$, $S \approx B$. Однако, при продольном точении скорость резания V многократно превышает скорость перемещения детали $V_{дет}$ при шлифовании. Поэтому производительности обработки при продольном точении значительно больше, чем при шлифовании.

Как известно, скорость резания при продольном точении твердосплавным резцом может принимать значения в пределах от 0 до 1000 м/мин и более, соответственно толщина среза a может изменяться от 0 до 1 мм и более. Поэтому определим значение величины α для V =1000 м/мин и a =0,1 мм, принимая β =20^0 (т.е. $tg\beta$ =0,364). В результате расчетов получено: α =1,2.

Исходя из табл. 1, при α =1,2 величина x приближается к установившемуся значению $x \to 1$. В этом случае расхождение результатов расчетов, выполненных по уравнению (2) и зависимости (6), небольшое – в пределах 5 %. Это указывает на возможность использования зависимости (6) для определения величины x и соответственно температуры резания θ.

Таким образом показано, что в условиях продольного точения расчет величины x можно производить по зависимостям (6) и (7), а в условиях шлифования – по зависимости (11), поскольку при продольном точении величина α значительно больше, чем при шлифовании, – свыше 20 раз, а производительность обработки – свыше 100 раз.

При условии $x \to 1$ в первом приближении при продольном точении температуру резания θ можно определить по упрощенной зависимости:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho}. \qquad (15)$$

В этом случае температура резания θ зависит лишь от одной переменной – условного напряжения резания σ: чем больше σ, тем больше θ. Следовательно, появляется возможность увеличения параметров режима резания и соответственно производительности обработки без увеличения температуры резания θ. Однако для реализации данного условия необходимо обеспечить высокую режущую способность лезвийного инструмента при высокой температуре резания и снизить интенсивность трения в зоне резания, что можно достичь применением современных сборных твердосплавных и керамических лезвийных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства, например производства фирмы ISCAR [8–10].

Необходимо отметить, что при шлифовании условное напряжение резания σ значительно больше, чем при продольном точении вследствие интенсивного трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом и наличия отрицательных передних углов у режущих зерен. Этим обусловлена более высокая температура резания и высокая вероятность появления на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов при шлифовании по сравнению с точением. Этим также обусловлена возможность высокопроизводительного высокоскоростного резания при продольном точении без образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях, что согласуется с практическими данными.

Результаты исследований использованы на многочисленных предприятиях Украины при создании и внедрении эффективных технологических процессов механической обработки (точения, шлифования и т.д.) с применением современных режущих инструментов зарубежного производства. Это позволило в 2…5 раз увеличить производительность обработки, обеспечить высокие показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей, снизить себестоимость обработки.

Выводы. В работе приведены полученные

упрощенные аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке, позволяющие довольно просто рассчитать температуру резания. Показано, что основная доля тепла, образующегося при шлифовании, уходит в обрабатываемую деталь, а при лезвийной обработке, наоборот, фактически все тепло уходит в образующиеся стружки вследствие увеличенной производительности обработки. При этом температура резания при шлифовании больше, чем при лезвийной обработке (продольном точении) в связи с увеличенным условным напряжением резания, обусловленным интенсивным трением связки круга с обрабатываемым материалом и наличием отрицательных передних углов на режущих зернах. Поэтому основным условием уменьшения температуры резания при механической обработке следует рассматривать уменьшение условного напряжения резания.

Список литературы

1. *Резников А.Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов / *А.Н. Резников*. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. *Якимов А.В.* Оптимизация процесса шлифования / *А.В. Якимов*. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. *Евсеев Д.Г.* Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / *Д.Г. Евсеев*. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. –127 с.
4. *Добротворский С. С.* Энергетический подход к определению технологических режимов при высокоскоростной обработке / *С. С. Добротворский, А.К. Мялица, Е.В. Басова [и др.]* // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Харьков : НАУ "ХАИ", 2014. – № 65. – С. 69-74.
5. *Новиков Ф.В.* Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / *Ф.В. Новиков, С.М. Яценко* // Физические и компьютерные технологии: междунар. Научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г.: труды – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8-20.
6. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / *А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, Б. С. Серов, А.А. Якимов*. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
7. *Бобров В. Ф.* Основы теории резания металлов / *В. Ф. Бобров*. – М. : Машиностроение, 1975. – 344 с.
8. *Новиков Ф.В.* Теоретическое обоснование условий повышения эффективности высокоскоростной обработки / *Ф.В. Новиков, О.С. Кленов* // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2014. –№42 (1085). – С. 106–111.
9. *Кленов О.С.* Математическое моделирование параметров теплового процесса при абразивной и лезвийной обработках / *О.С. Кленов* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вып. № 35, 2014. – С. 19–25.
10. *Кленов О.С.* Высокоэффективные технологии механической обработки / *О.С. Кленов* // Фізичні та комп`ютерні технології. Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції, 7–9 грудня 2016, м. Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 139-145.

References (transliterated)

1. *Reznikov A.N.* Teplofizika protsessov mekhanitheskoy obrabotki materialov. Moscow. Mashinostroenie. 1981.279 p. Print.
2. *Yakimov A.V.* Optimizatsiya protsessa shlifovaniya. Moscow. Mashinostroenie. 1975. 175 p. Print.
3. *Evseev D. G.* Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke. Saratov. Izd-vo Sarat. Un-ta. 1975.127p. Print.
4. *Dobrotvorskyyi S. S., Mialytsa A.K., Basova E.V.* Energeticheskij podxod k opredeleniyu texnologicheskix rezhimov pri vysokoskorostnoj obrabotke [Energy approach to the definition of technological regimes in HSM]. Kharkov, Nats. aero-kosm. un-t «Khark. aviats. in-t », 2014, No 65, pp. 69-74.
5. *Novikov F.V., Yatsenko S.M.* Povyshenie effektivnosti tekhnologii finishnoy obrabotki detaley par treniya porshnevykh nasosov. Fizitheskie i kompiuternye tekhnologii: mezhdun. Nauthn. -tekhn. konf., 19-20.04ю2007. Kharkov: KhNPK "FED", 2007. – pp. 8-20. Print.
6. *Yakimov A. V., Novikov F. V., Novikov G. V., Serov B. S., Yakimov A.A.* Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlifovaniya materialov: ucheb. posobiye. Odessa. OGPU, 1999. 450 p. Print.
7. *Bobrov V. F.* Osnovy teorii rezaniya metallov. Moscov. 1975. 344 p.
8. *Novikov F.V., Klenov O.S.* Teoretitheskoe obosnovanie usloviy povysheniya effektivnosti vysokoskorostnoy obrabotki. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Tekhnologiy v mashinobuduvanni. – Kharkiv: NTU "KhPI". 2014. No42 (1085). pp. 106–111.
9. *Klenov O.S.* Matematicheskoye modelirovaniye parametrov teplovogo protsessa pri abrazivnoy i lezviynoy. Nadíynist' ínstrumentu ta optimízatsíya tekhnologíchnikh sistem. Zbírnik naukovikh prats'. – Kramators'k. 2014 No 35. pp. 19–25.
10. *Klenov O.S.* Vysokoeffektivnyye tekhnologii mekhanicheskoy obrabotki. Fízichní ta komp`yuterní tekhnologíí. Materíali KHKHÍÍ Mízhnarodnoí naukovo-praktichnoí konferentsíí, 7–9.12. 2016. Kharkov. LÍRA. 2016. pp. 139-145.

Поступила (received) 20.03.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Спрощені підходи до аналітичного визначення температури різання при механічній обробці / О. С. Кленов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 51–55. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

Упрощенные подходы к аналитическому определению температуры резания при механической обработке / О.С. Кленов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 51–55. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

Simplified approaches to analytical determination of cutting temperature during machining / O. Klenov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.51–55. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кленов Олег Станіславович – кандидат технічних наук, директор, Фірма «ДіМєрус Інженерінг» ТОВ, м. Харків; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com;

Кленов Олег Станиславович – кандидат технических наук, директор, Фирма «ДиМерус Инженеринг» ООО, г. Харьков; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com;

Klenov Oleg Stanislavovith – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), director of the firm "DiMerus Engineering" Ltd, Kharkiv; tel .: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com.

УДК 621.865.8

С.В.КОВАЛЕВСЬКИЙ, О.С.КОВАЛЕВСЬКА

КОНЦЕПЦІЯ ДІАГНОСТИКИ МЕХАНІЗМУ МОБІЛЬНОГО ВЕРСТАТА – РОБОТА ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЙОГО ЕТАЛОННОЇ МОДЕЛІ

Пропонується концепція діагностики механізму мобільного верстата-робота на основі нейромережевої моделі, що дозволяє оперативно враховувати змінну виробниче середовище. Запропоновано новий підхід із застосуванням спектрального аналізу функцій поглинання механізмом верстата - робота збудженої акустичної хвилі в заданому діапазоні. Встановлено, що спектр власних порушених коливань об'єкта є найбільш інформативним щодо різних властивостей і параметрів об'єкта. Представлені зразки амплітудно-частотних характеристик при позиціонуванні механізму експериментально стенду по характерних точках робочого простору.

Ключові слова: діагностика, еталонна модель, верстат-робот, акустичний аналіз.

Предлагается концепция диагностики механизма мобильного станка-робота на основе нейросетевой модели, позволяющая оперативно учитывать переменную производственную среду. Предложен новый подход с применением спектрального анализа функций поглощения механизмом станка - робота возбужденной акустической волны в заданном диапазоне. Установлено, что спектр собственных возбужденных колебаний объекта является наиболее информативным относительно различных свойств и параметров объекта. Представлены образцы амплитудно-частотных характеристик при позиционировании механизма экспериментально стенда по характерным точкам рабочего пространства.

Ключевые слова: диагностика, эталонная модель, станок- робот, акустический анализ.

The concept of diagnostics of the mechanism of the mobile machine-robot on the basis of the neural network model is proposed, which allows to quickly taking into account the variable production environment. A new approach is proposed with the use of spectral analysis of the absorption functions of the machine-robot mechanism of an excited acoustic wave in a given range. It is established that the spectrum of the object's own excited oscillations is the most informative concerning various properties and parameters of the object. Samples of amplitude-frequency characteristics are presented in the positioning of the mechanism of the experimental stand by the characteristic points of the working space.

Keywords: diagnostics, reference model, machine-robot, acoustic analysis.

Вступ. Удосконалення обладнання, методів, способів здійснення процесів з його участю, супроводжуються поглибленням інтеграції механічної частини обладнання з системою контролю, діагностики та управління (при цьому, контроль є частиною діагностики, попередньої управління), що пояснюється законами еволюції технічних систем [1,2,3 і ін.]. Для технологічних процесів і обладнання проблема створення та ефективної експлуатації таких інтегрованих мехатронних систем на будь-якому етапі їх життєвого циклу залишається вкрай актуальною, особливо для нового обладнання, такого, як мобільні верстати-роботи [4,5,6,7,8,9,10].

Для точного позиціонування робочих органів виконавчих механізмів при оптимальних швидкостях і прискореннях їх рухів по заданій траєкторії, необхідно мати інформативні системи ідентифікації об'єктів. Літературні дані, присвячені завданню кінематики і динаміки виконавчих механізмів, свідчать про необхідність оптимізації управління механізмами технологічних машин. Так як основні переваги обладнання з паралельною кінематикою найбільш яскраво проявляються в умовах великих швидкостей переміщення виконавчих механізмів при заданій точності траєкторії переміщення інструменту і його позиціонування, то необхідно також враховувати ефективність процесів за критеріями витрат енергії.

Раніше, в роботах [4,5,6], було висловлено і частково підтверджено припущення про те, що в якості інформативного джерела діагностичного сигналу слід використовувати його амплітудно-частотну характеристику власних коливань об'єкта в акустичному діапазоні.

Серед активно розвиваються методів діагностики об'єктів і процесів слід виділити методи їх акустичної діагностики і створення на цій базі систем управління [5, 11]. У зв'язку з цим, метою представленого дослідження є підтвердження можливості многокомпонентного аналізу параметрів об'єктів (процесів і обладнання).

Матеріали та результати дослідження.

З огляду на особливу важливість, проблеми авторами статті пропонується комплексний підхід, при якому процеси контролю і діагностики представляють собою процедуру створення еталонної моделі об'єкта управління і підтримки цієї моделі в актуальному стані протягом технологічної операції. Основою такого підходу є спектр акустичного сигналу, відбитий від елементів технологічної системи і система його перетворення (рис.1).

Рис. 1 – Структурна схема створення еталонної моделі мобільного верстата робота

В основу створення еталонної моделі покладена гіпотеза про інформативних можливостях спектра акустичного сигналу як джерела даних про властивості і параметри об'єкта. Як показано в роботах [5, 8,9,10], спектр власних порушених коливань об'єкта є найбільш інформативним щодо різних властивостей і параметрів об'єкта. Однак, інформативні можливості діагностичного спектру акустичного сигналу значно розширюються шляхом збудження спектрів вимуше-

© С.В. Ковалевський, О.С. Ковалевська, 2017

них коливань «білим шумом», що наводиться випромінювачем в тестовому діапазоні.

Для реалізації такого підходу прийняті наступне:

- W (f) – сигнал збудження об'єкта «білим шумом»;

-R [W (f)] – реакція об'єкта на збудження «білим шумом»;

X_k, X_l…, X_r…- властивості і параметри об'єкта (конфігурація, швидкість, деформація, зусилля, напруження, швидкість, прискорення, температура і т.п.) R [W (f)] = F {X_k, X_l …X_r …}

Завданням діагностики і створення еталонної моделі об'єкта є визначення властивостей і параметрів об'єкта X_k, X_i…X_r… по реакції R[W(f)] (рис.2).

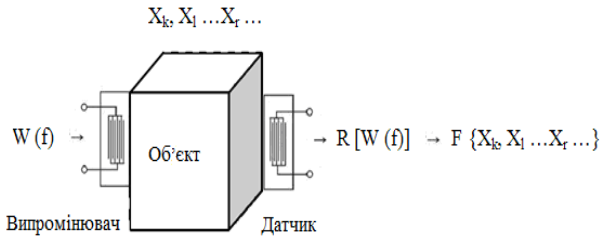


Рис. 2 – Інформаційна модель визначення властивостей і параметрів об'єкта : W (f) ➞ Object ➞ R [W (f)] ➞ F {X_k, X_l …X_r …} ➞ X_k, X_l …X_r

Випромінювач і приймач діагностичного пристрою є оборотні п'єзоелектричні елементи, на які подаються (випромінювач) і з яких знімаються (датчик) посилюються сигнали. Оскільки діагностика об'єкта проводиться щодо опорного сигналу «білого шуму», то такий підхід дозволяє нормувати вихідні діагностичні сигнали щодо опорного сигналу.

На рис.3 (а, б, в, г) представлені зразки амплітудно-частотних характеристик при позиціонуванні механізму експериментально стенду характерних точках робочого простору механізму.

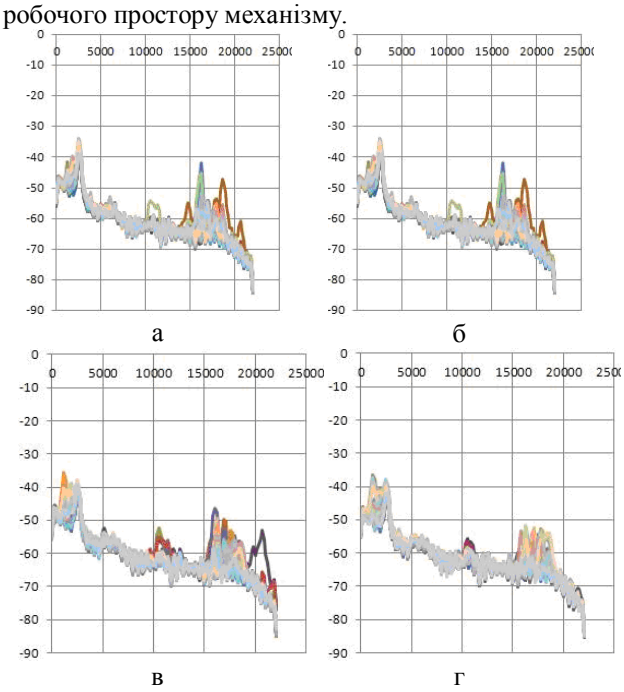


Рис. 3 - Зразки АЧХ при позиціонуванні механізму експериментального стенду: а -37 точок Z=5 mm; б - 37 точок Z=50 мм; в - 37 точок Z=150 мм; г – 37точок Z=200мм.

У роботах [7,8,9,10,11] нами показано, що рішення перетворення X_k, X_l…, X_r… = F {X_k, X_l …X_r …} рекомендується виконувати із застосуванням нейромережевого моделювання.

Кожен вимір мало максимально можливий захист від випадкових флуктуацій сигналу. Це досягалося тим, що при кожній реалізації елементів плану експерименту вимірювання усереднюють в циклі з 100 послідовних сканувань спектра з дискретністю спектра в 178,3 від 0 до 20000 Гц. Повно факторного експерименту. рандомизацією сполучень факторів дозволив сформувати базу даних, де факторами були координати позиціонування виконавчого механізму експериментального стенду .

Значення характерних точок робочого простору представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Математичний опис нейромережної моделі, побудованої на даних АЧХ

Характерні точки		
Позначення характерних точок	Частота, Гц	Рівень значущості
S7	1206	0,90
S8	1378	0,60
S60	10336	0,47
S68	11714	0,58
S86	14815	0,46
S89	15332	0,70
S90	15504	0,47
S93	16021	0,69
S95	16365	0,41
S106	18260	0,36
S108	18605	0,48
S111	19121	0,71
S113	19466	0,51
S115	19811	0,42
S116	19983	0,53
S120	20672	0,92
S123	21189	0,49
S126	21705	1,00
S127	21878	0,44

У таблиці представлені найбільш значущі точки. Акустичний спектр відгуку, що представляє собою суму збуджених, поглинених і відображених акустичних хвиль піддається обробці на глибоких нейронних мережах. Результатом такої обробки є модель, що інтегрує особливості багатошарових перцептронів і карт Кохонена. Таке об'єднання можливе за допомогою нейронних мереж каскадної конфігурації і модифікованим нейроподібним елементом.

У програмному пакеті NeuroPro [8,9,10] надана можливість застосувати отриману модель для прогнозування властивостей і параметрів об'єкта по АЧХ і тим самим забезпечити функціонування еталонної моделі, яка використовується для інтелектуального управління верстатом - роботом.

Фрагмент вербального опису нейромережної моделі позиціонування механізму експериментального

стенду по характерних точках робочого простору наведено нижче.

Поля бази даних (вихідні синдроми):
S7, S8, S60, S68, S86, S89, S90, S93, S95, S106, S108, S111, S113, S115, S116, S120, S123, S126, S127
Поля бази даних (кінцеві синдроми): Z
Предобробка вихідних полів БД для подачі мережі:
S7= (S7--42,555)/7, 935001
S8= (S8--45, 1)/8, 17
…….
S126= (S126--70, 73)/6, 700001
S127= (S127--70,695)/6,445
Функциональные перетворювачі:
Сигмоїда 1 (A)=A/(0,1+|A|)
Синдроми 1-го рівня:
Синдроми1_1=Сигмоїда1(-0,2786306*S7-0,39386*S8 +0,164519*S60-0,3653027*S68+0,3126704*S86-0,03144212*S89-0,06509873*S90+0,3476969 *S93-0, 1654247*S95-0, 3095458*S106+0, 2062864*S108+0, 1001174*S111-0, 2285762*S113+0, 1377052 *S115+0, 08191856*S116-0, 1922183*S120+ 0, 09077964*S126-0, 1923114)
……..
Синдром 1_20=Сигмоїда1(0,2446884*S7+0,0500133 *S60-0, 1570076*S68+0, 06861026*S86-0, 2121315* S89-0, 03423228*S90+0, 6315479*S93-0, 2464655* S95+0, 006158689*S106-0, 2421574*S108+0, 3484654 *S111+0, 01279015*S113+0, 1337698*S115-0, 3317453 *S120-0, 007852481*S123+0, 08879511*S126-0, 2048413 *S127-0, 1658072)
Кінцеві синдроми:
Z=0,9342992*Синдром1_1-0,8471334*Синдром1_2+ 0,7881347*Синдром1_3-0,9805002*Синдром1_4+ 0,8393618*Синдром1_5-0,796478*Синдром1_6+ 0,9282416*Синдром1_7+0,9115893*Синдром1_8- 0,7316513*Синдром1_9+0,8834189*Синдром1_10+ 0,8092021*Синдром1_11+0,742706*Синдром1_12+ 0,7383921*Синдром1_13+Синдром1_14-0,8908381* Синдром1_15+0,8708463*Синдром 1_16-0,6654512* Синдром1_17+0,8319975*Синдром1_18-0,9760703* Синдром1_19-Синдром1_20-0,3083902
Постобробка кінцевих синдромів:
Z=((Z*245) +255)/2)

Таким чином, після обробки інформації щодо позиціонування у кожному з характерних положень виконавчого органу, маємо еталонну модель, що дозволяє коригувати координати переміщень при обробці або складанні у верстатах – роботах. Отримані результати дослідження підтверджують можливості многокомпонентного аналізу параметрів об'єктів (процесів і обладнання) за допомогою еталонних моделей, побудованих на основі нейронних мереж.

Висновки. Запропоновано концепцію діагностики механізму мобільного верстата-робота на основі нейромережевої моделі, що дозволяє оперативно враховувати змінну виробниче середовище.

Проведені експерименти підтвердили гіпотезу, висунуту спочатку, про інформативних можливостях спектра акустичного сигналу як джерела даних про властивості і параметри об'єкта, які до того ж мають тенденцію розширюватися при порушенні спектрів вимушених коливань «білим шумом», що наводиться випромінювачем в тестовому діапазоні.

Спектр власних порушених коливань об'єкта є найбільш інформативним щодо різних властивостей і параметрів об'єкта.

Розроблено методику створення нейромережевої еталонної моделі на основі акустичного спектру, застосування якої дозволяє використовувати акустичну діагностику для механізмів технологічних машин, що дозволяє розширити діапазон можливостей підвищення точності і продуктивності їх роботи.

Показана можливість використання запропонованого підходу до управління складними технологічними машинами, такими, як верстати з механізмами на основі паралельної кінематики для підвищення точності позиціонування виконавчих механізмів, забезпечення їх динамічної настройки і оптимізації траєкторій переміщень робочих органів обладнання (ріжучого інструменту).

Вирішено комплекс науково-технічних завдання, впровадження яких, вносить значний внесок у розвиток систем механообробки, що полягає у розширенні функціональних можливостей мобільних верстатів-роботів в складі ділянок механічної обробки.

Пропонується використання даного підходу до управління складними технологічними машинами, такими, як верстати з механізмами на основі паралельної кінематики для підвищення точності позиціонування виконавчих механізмів, забезпечення їх динамічної настройки і оптимізації траєкторій переміщень робочих органів обладнання.

Список литературы:

1. *Хубка*. Теория технических систем. – Г.: Мир, 1987. – 208 с.
2. *Кузнецов Ю. М., Луцив И. В., Дубняк С. А.* Теория технических систем. Под общей ред. проф. Ю. М. Кузнецова.– К., – Тернополь, 1997. – С. 6–9.
3. *Селиванов С.Г., Гузаиров М.Б.* Системотехника инновационной подготовки производства в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2012. – 568 с.
4. *Ковалевский С. В.* Диагностика технологических процессов и проблемы их упорядочения / *С. В. Ковалевский, В. Б.Черненко* // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем : тезисы докладов 6-й международной научно-технической конференции. - Краматорск: НКМЗ, 1995. - С. 29-30.
5. *Ковалевский С. В.* Диагностика остаточных напряжений в изделии / *С. В. Ковалевский, А. В. Колот* // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем. - Краматорск, 1996. -№. 6. - С. 155-157.
6. *Ковалевский С. В.* Диагностика качества управления системами на основе анализа временных отклонений / *С. В. Ковалевский, В. Б. Гитис* // Придніпровський науковий вісник. Донбаський випуск. - Дніпропетровськ, 1998. - № 110 (177) грудень 1998. - С. 96-99.
7. Диагностика качества технологической системы с применением нейросетевых моделей / *С. В. Ковалевский, И. Н. Стародубцев, К. В. Носков, А. С. Янюшкин, Д. В. Лобанов* // Нейросітьові технології і їх застосування : збірник праць Всеукраїнської наукової конференції з міжнародною участю. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – С. 40–45.
8. *Ковалевський С. В.* Акустическая диагностика качества сборки и работоспособности изделий управляющей гидравлики / *С. В. Ковалевский, Р. Ю. Кулик* // Нейромережеві технології та їх застосування НМТіЗ-2016 : збірник наукових праць міжнародної наукової конференції / за заг. ред. С. В. Ковалевського. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – С. 73–78.
9. *Kovalevskyy S.* Neural network analysis of natural frequencies spectrum of products for the diagnosis of their parameters / *S.*

Kovalevskyy, I. Starodubcev // 12th International conference "Research and Development in Mechanical Industrry" RaDMI 2012, 13-17 September. – Vrnjcka Banja, Serbia, 2012. – Vol. 1. – P. 230–234.
10. *Kovalevskyy S. V.* Acoustic Monitoring with Neural Network Diagnostics / *S. V. Kovalevskyy, O. S. Kovalevska* // American Journal of Neural Networks and Applications. – 2015. – Vol. 1, No. 2. – P. 39-42. – doi: 10.11648/j.ajnna.20150102.12
11. Diagnostics of Technological Systems and Engineering Products (using neural network approach) : scientific monography / S. V. Kovalevskii, O. S. Kovalevska, P.V. Dašić. – Vrnjačka Banja : SaTCIP, 2016. – 169 p

References (transliterated)

1. *Khubka*. Teoriya tekhnicheskikh sistem [Theory of technical systems]. Mir, 1987. – 208 p.
2. *Kuznetsov YU. M., Lutsiv I. V., Dubnyak S. A.* Teoriya tekhnicheskikh sistem [Theory of technical systems] Ternopol, 1997. pp. 6–9.
3. *Selivanov S.G., Guzairov M.B.* Sistemotekhnika innovatsionnoy podgotovki proizvodstva v mashinostroyenii [System engineering of innovative production preparation in mechanical engineering]. Moscow. Mashinostroyeniye, 2012. 568 p.
4. *Kovalevskiy S. V. Chernenko, V. B.* Diagnostika tekhnologicheskikh protsessov i problemy ikh uporyadocheniya [Diagnostics of technological processes and problems of their ordering] Nadezhnost' rezhushchego instrumenta i optimizatsiya tekhnologicheskikh sistem : tezisy dokladov 6-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Kramatorsk: NKMZ, 1995. pp. 29- 30.
5. *Kovalevskiy S. V., Kolot A. V.* Diagnostika ostatochnykh napryazheniy v izdelii [Diagnostics of residual stresses in the product] Nadezhnost' rezhushchego instrumenta i optimizatsiya tekhnologicheskikh sistem. Kramatorsk, 1996. № 6. pp. 155-157.
6. *Kovalevskiy S. V., Gitis V. B.* Diagnostika kachestva upravleniya sistemami na osnove analiza vremennykh otkloneniy [Diagnostics of quality management systems based on the analysis of temporal deviations] Pridníprovs'kiy naukoviy vísnik. Donbas'kiy vipusk. Dnípropetrovs'k, 1998. № 110 (177) 12.1998. pp. 96- 99.
7. *Kovalevskiy S. V., Starodubtsev I. N., Noskov K. V., Yanyushkin A. S., Lobanov D. V.* Diagnostika kachestva tekhnologicheskoy sistemy s primeneniyem neyrosetevykh modeley [Diagnostics of the quality of the technological system using neural network models]. Neyrosít'oví tekhnologíí í ĭh zastosuvannya zbírnik prats' Vseukraĭns'koĭ naukovoĭ konferentsíí z mízhnarodnoyu uchastyu. Kramatorsk. DDMA, 2013. pp. 40–45.
8. *Kovalevs'kiy S. V., Kulik R. YU* Akusticheskaya diagnostika kachestva sborki i rabotosposobnosti izdeliy upravlyayushchey gidravliki [Acoustic diagnostics of assembly quality and working capacity of control hydraulics products] Neyromerezheví tekhnologíí ta ĭkh zastosuvannya NMTíZ-2016 zbírnik naukovikh prats' mízhnarodnoĭ naukovoĭ konferentsíí. Kramatorsk. DDMA, 2016. pp. 73–78.
9. *Kovalevskyy S., Starodubcev I.* Neural network analysis of natural frequencies spectrum of products for the diagnosis of their parameters. 12th International conference "Research and Development in Mechanical Industrry" RaDMI 2012, 13-17 September. – Vrnjcka Banja, Serbia, 2012. Vol. 1. pp. 230–234.
10. *Kovalevskyy S. V., Kovalevska O. S.* Acoustic Monitoring with Neural Network Diagnostics. American Journal of Neural Networks and Applications. 2015. Vol. 1, No. 2. P. 39-42. doi: 10.11648/j.ajnna.20150102.12
11. *Kovalevskii S. V., Kovalevska O. S., Dašić P.V.* Diagnostics of Technological Systems and Engineering Products (using neural network approach) : scientific monography. Vrnjačka Banja. SaTCIP, 2016. – 169 p

Поступила (received) 01.07.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Концепція діагностики механізму мобільного верстата – робота для створення його еталонної моделі / С.В. Ковалевський, О.С. Ковалевська // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 56–59. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Концепция диагностики механизма мобильного станка – робота для создания его эталонной модели / С.В. Ковалевский, Е.С.Ковалевская // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 56–59. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

The concept of diagnostics of the mechanism of a mobile machine-robot for creating its reference model / S. Kovalevskyy E. Kovalevska // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.56–59. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковалевський Сергій Вадимович **–** доктор технічних наук, професор, кафедра технології машинобудування ДДМА, Краматорськ, тел. (0626) 41-47-70, e-mail: kovalevskii@dgma.donetsk.ua;

Ковалевский Сергей Вадимович **–** доктор технических наук, профессор, кафедра технологии машиностроения ДГМА, Краматорск, тел. (0626) 41-47-70, e-mail: kovalevskii@dgma.donetsk.ua;

Kovalevskyy Serhiy Vadimovich **–** Dr. Sc., Professor, Department of Manufacturing Engineering DSEA, Kramatorsk, tel. (0626) 41-47-70, e- mail: kovalevskii@dgma.donetsk.ua;

Ковалевська Олена Сергіївна – кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, тел. (0626) 41-47-70, e-mail: olenakovalevska@gmail.com;

Ковалевская Елена Сергеевна - кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии машиностроения ДГМА, г. Краматорск, тел. (0626) 41-47-70, e-mail: olenakovalevska@gmail.com;

Kovalevska Olena - Ph.D., Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering DSEA, Kramators'k, tel. (0626) 41-47-70, e- mail: olenakovalevska@gmail.com.

УДК 621.375.826

Г. И. КОСТЮК, Ю.В. ШИРОКИЙ

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУР НА РИ ИЗ «ВОЛКАР»

Досліджено залежності максимальної температури, швидкості росту температури і температурних напружень від щільності теплового потоку ($q = 10^8 - 10^{11}$ Вт/м^2) для різних часів його дії ($t = 10^{-10} - 10^{-4}$ с), також отримано залежності обсягу нанокластера при радіусах плями контакту $R = 5\cdot10^{-7}$, $R = 10^{-6}$ м від технологічних параметрів обробки, що дозволило отримати необхідні технологічні параметри для отримання наноструктур.

Ключові слова: объём зерна, наноструктуры, ВолКар, плотность теплового потока, лазер, температурные напряжения.

Исследованы зависимости максимальной температуры, скорости роста температуры и температурных напряжений от плотности теплового потока ($q = 10^8 – 10^{11}$ Вт/м^2) для разных времён его действия ($t=10^{-10} – 10^{-4}$ с), также получены зависимости объема нанокластера при радиусах пятна контакта $R=5\cdot10^{-7}$, $R=10^{-6}$ м от технологических параметров обработки, что позволило получить требуемые технологические параметры для получения наноструктур.

Ключевые слова: volume of grain nanostructure VolKar, heat flux, laser, thermal stresses.

The dependence of the maximum temperature, the temperature of the growth rate and thermal stresses on the heat flux density ($q = 10^8 - 10^{11}$ W / m^2) for different times of its operation ($t = 10^{-10} - 10^{-4}$ c), also obtained according to the nanocluster volume with radii $R = 5\cdot10^{-7}$, $R = 10^{-6}$ m from the technological machining parameters as possible to obtain the required process parameters for nanostructures.

Keywords: technological parameters of the laser, the femtosecond laser, solid alloy "VolKar", cutting tools, nanostructured layers.

Введение. Созданный на базе карбида вольфрама твёрдый сплав ВолКар пока ещё не имеет широкого применения в технике, из-за относительно невысокой износостойкости (HV 18 – 24 ГПа), тогда как твёрдость применения нанопорошков WC повышает твёрдость (HV 26,4 ГПа), очевидно даже у спеченного из нано порошков ВолКара работоспособность и износостойкость может быть выше. Если же обеспечить появление наноструктур на поверхности за счёт дополнительного воздействия лазерного излучения, то можно ожидать получение высокой микротвёрдости поверхности, а, следовательно, и износостойкость.

Всё это говорит о важности рассмотрения вопроса о перспективе создания наноструктур на режущем инструменте из размера зерна порядка 10 нм, что существенно повысит микротвёрдость ВолКар.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных

технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса. В настоящие время, относительно большое число работ, выполнено по изучению наноструктур (НС), основная масса работ посвящена их экспериментальному изучению. Теоретические работы в этом направлении даны в монографиях [1-11, 15]. Обобщение результатов экспериментальных работ представлено в монографиях [12,13].

Несмотря на то, что в работе [14] рассмотрена возможность обработки нового твёрдого сплава ВолКар, результатов его применения в производстве и даже в экспериментах в настоящее время нет. Очевидно, что ожидать значительного повышения эффективности и работоспособности твёрдых сплавов за счёт применения ВолКар не приходится, даже при использовании ВолКар с полученного из порошка нано размеров (100 нм). Возможность же обработки этого твёрдого сплава лучом лазера с целью образования наноструктурного слоя с достаточно малыми размерами зерна (порядка 10 нм), может существенно улучшить свойства этого сплава и обеспечить высокую работоспособность и эффективность его работы. Выше изложенное говорит об актуальности и своевременности теоретических исследований по возможности образования НС на твёрдом сплаве ВолКар.

Теоретические методы исследования. Решалась совместная задача теплопроводности и термоупругости, которая позволяла получать поля температур, температурных напряжений, оценивать скорость роста температуры и в дальнейшем с учётом критериев образования НС находить объёмы зерна и ограничив размер зерна 100 нм, оценить зоны технологических параметров лазера, при которых есть вероятность получения НС, так как ранее была проверена адекватность [1] этой модели, то результаты расчётов будут достоверными.

Результаты расчётов и их обсуждения. Для технологических режимов с плотностью теплового потока $q = 10^8 – 10^{11}$ Вт/м^2 и времён его действия $t=10^{-10} – 10^{-4}$ с были проведены расчёты максимальных температур, скоростей роста температур и температурных напряжений на различных глубинах, результаты которых представлены на рисунок 1 – 3.

Так анализ рисунка 1 показывает, что по температурам при больших временах ($t=10^{-4} – 10^{-5}$ с), реально можно получать НС при плотностях теплового

© Г.И. Костюк, Ю.В. Широкий, 2017

потока q = 10^8 – 10^9 Вт/м^2 (рис.1,а., рис.1,б). Уменьшение времени действия до t=10^{-6} – 10^{-7} с приводит к тому, что НС возможно получать при плотностях теплового потока q = 10^9 – 10^{10} Вт/м^2 и даже при q = 10^{11} Вт/м^2, но только на очень больших глубинах 5,33·10^{-6} м (рис.1,в, рис.1,г). Снижение времени действия до t=10^{-8} – 10^{-10} с приводит к тому, что НС образуются при плотностях теплового потока q = 10^{10} – 10^{11} Вт/м^2 на значительных глубинах причём глубина слоя, где реализуются НС может достигать 6,74·10^{-7} – 1,07·10^{-6} м. (рис.1, д, рис.1, е, рис.1, ж).

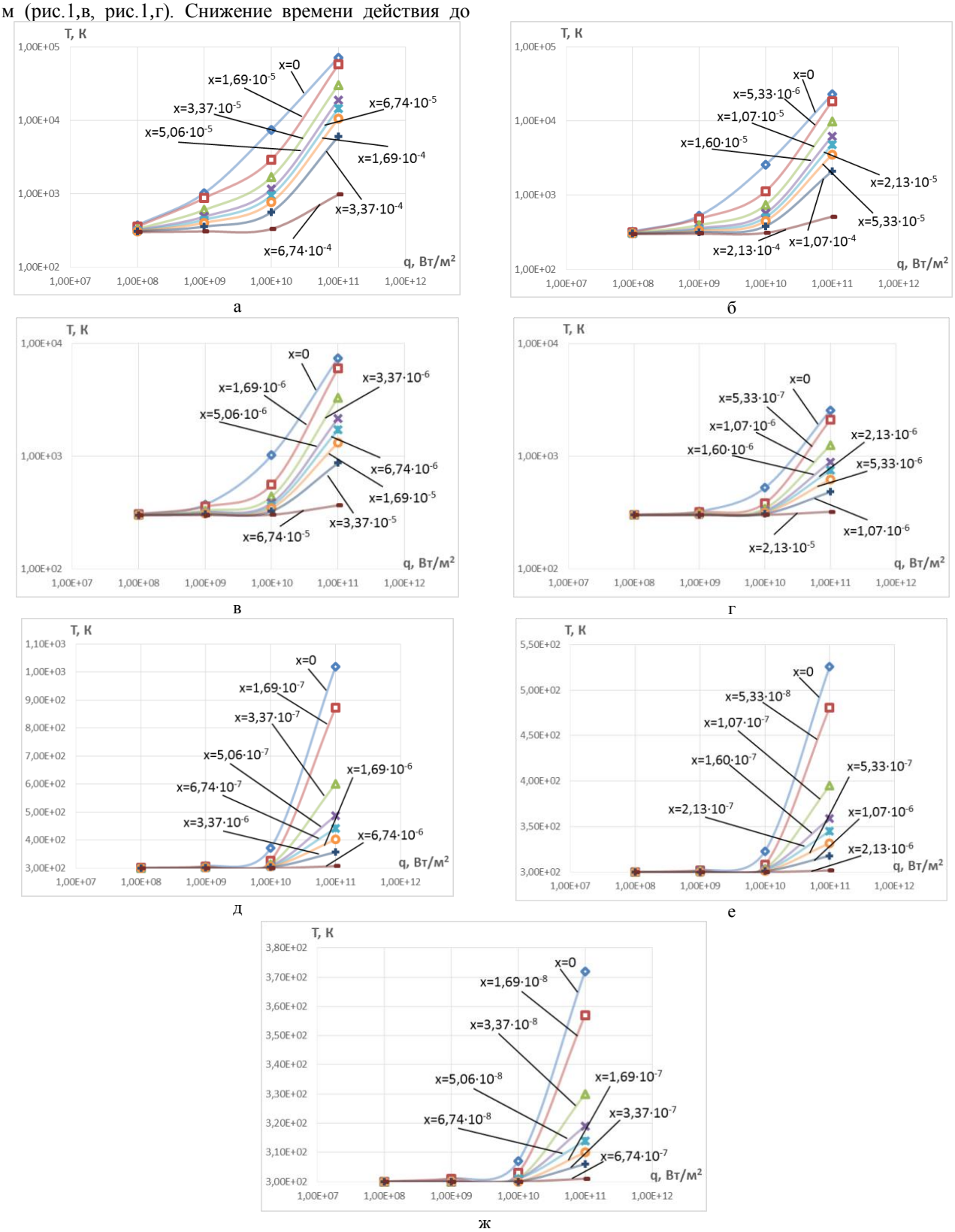
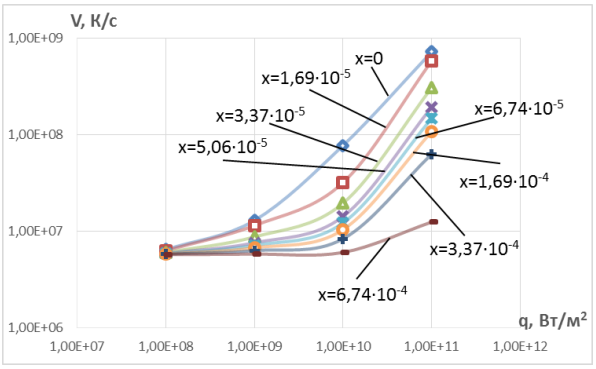
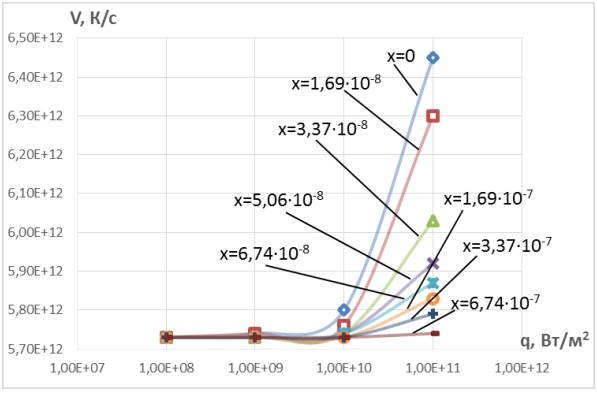


Рис.1. – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на материал «ВолКар» от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия:
а - t=10-4 с; б - t=10-5 с; в - t=10-6 с;
г - t=10-7 с; д - t=10-8 с; е - t=10-9 с;
ж - t=10-10 с

Результаты расчёта скорости роста температур представлены на рис.2 для 2-х режимов $t=10^{-4}$ с и $t=10^{-10}$ с. Видно, что для этих режимов реализуются условия достаточные для образования НС по этому критерию, так как они превышают 10^7 К/с.



а

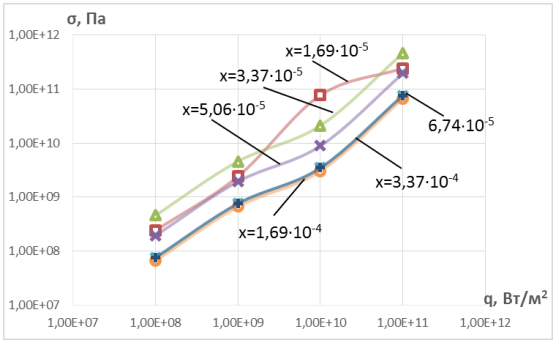


б

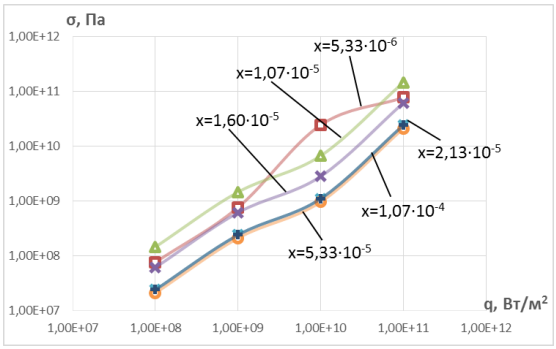
Рис. 2 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на материал «ВолКар» от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-4}$ с; б - $t=10^{-10}$ с

В связи с тем, что температурные напряжения могут ускорять процесс образования НС или даже непосредственно участвовать в их образовании при превышении их значения (10^{10} Па), поэтому были проведены расчёты температурных напряжений в диапазоне приведенных технологических параметров, результаты, которых представлены на рисунке 3.

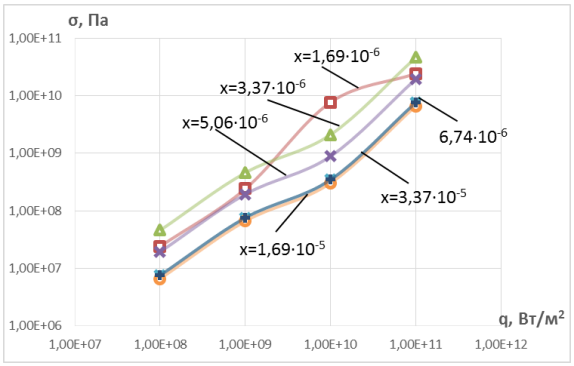
Видно, что при временах $t=10^{-4}$ – 10^{-5} с. реализуются температурные напряжения значительных величин и на достаточно больших глубинах до $2{,}13\cdot10^{-5}$ м, в этом случае даже есть вероятность при плотностях теплового потока $q = 10^{10} – 10^{11}$ Вт/м^2 есть возможность получения НС за счёт действия температурных напряжений, хотя в этих случаях температурный режим не соответствует необходимому для образования НС, температуры значительно выше, что говорит о вероятности снижения этого эффекта (рис. 3а, рис. 3б). При меньших временах действия $t=10^{-6}$ – 10^{-7} с. непосредственное образование НС за счёт действия температурных напряжений может быть реализовано, только на незначительных глубинах порядка $5{,}33\cdot10^{-7}$ – $3{,}37\cdot10^{-6}$ м. и плотности теплового потока $q = 10^{11}$ Вт/м^2 (рис.3,в, рис.3,г), а для остальных глубин и плотностей теплового потока есть возможность ускорения образования НС, за счёт действия температурных напряжений. При временах действия $t=10^{-8}$– 10^{-10} с есть вероятность только некоторого ускорения процесса образования НС и то при высоких плотностях теплового потока $q = 10^{10} – 10^{11}$ Вт/м^2 (рис. 3,д, рис. 3,е, рис. 3,ж).



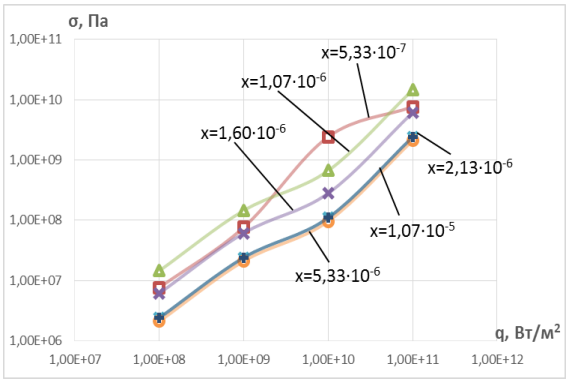
а



б

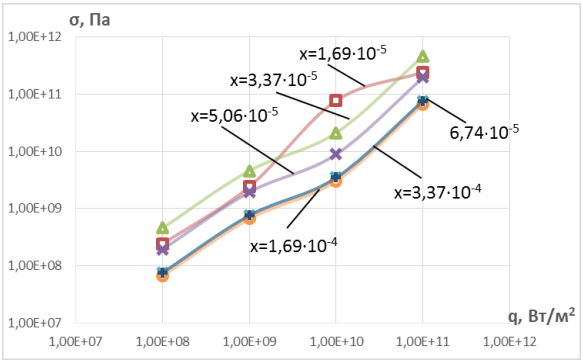


в

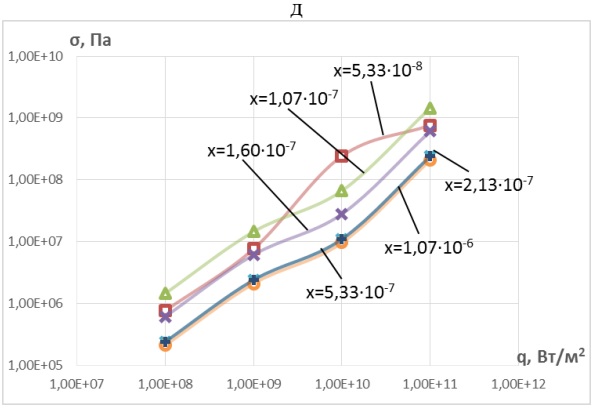


г

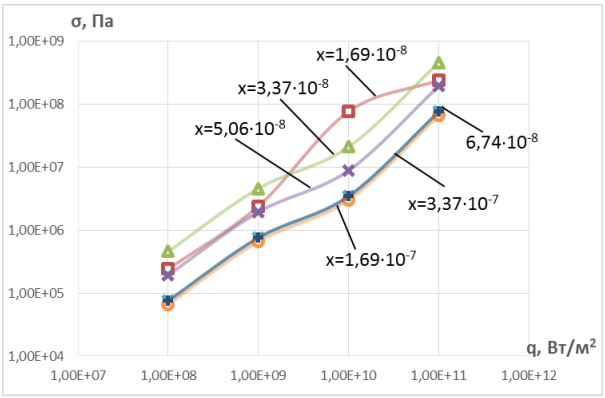
Рис.3 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на материал «ВолКар» от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия:
а - $t=10^{-4}$ с; б - $t=10^{-5}$ с; в - $t=10^{-6}$ с;
г - $t=10^{-7}$ с; д - $t=10^{-8}$ с; е - $t=10^{-9}$ с;
ж - $t=10^{-10}$ с.



д



е

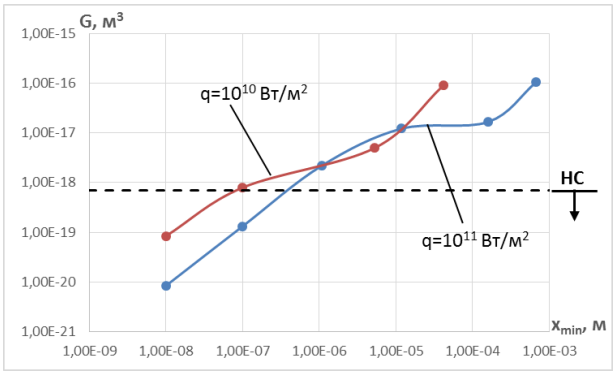


ж

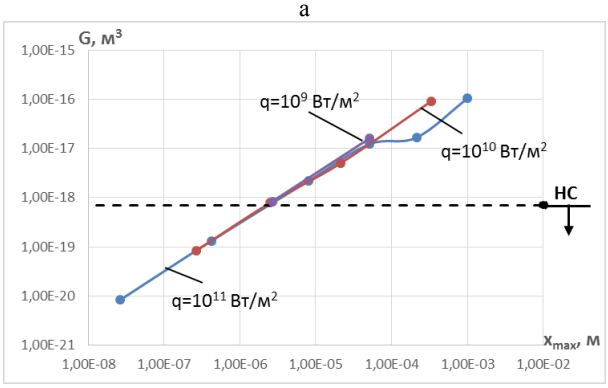
Рис. 3 – Окончание

Объем зерна определяет возможность реализации наноструктур в материале, а технологические параметры, которые их обеспечивают, являются важным результатом исследования. Кроме того, глубины залегания этого зерна также важны для конструирования поверхности деталей из наноструктур. Поэтому было проведено исследование зависимости объема нанокластера от минимальной и максимальной глубины (пунктиром был обозначен объем, соответствующий границе появления НС). Такие зависимости для радиуса пятна ЛИ на детали $R=10^{-6}$ м (рис. 4) и $R=5\cdot10^{-7}$ м (рис. 5). Сравнение этих рисунков показывает, что в последнем случае ($R=5\cdot10^{-7}$ м) при большей гамме технологические параметров есть возможность получения НС на твердом сплаве ВолКар.

Для экспресс-оценки технологических параметров, при которых реализуются НС, были построены объемные картины зависимости объема нанокластера от плотности теплового потока ЛИ и времени его действия (рис. 6, 7) для пятна контакта $R=10^{-6}$ м (рис. 6) и для пятна контакта $R=5\cdot10^{-7}$ м (рис. 7).

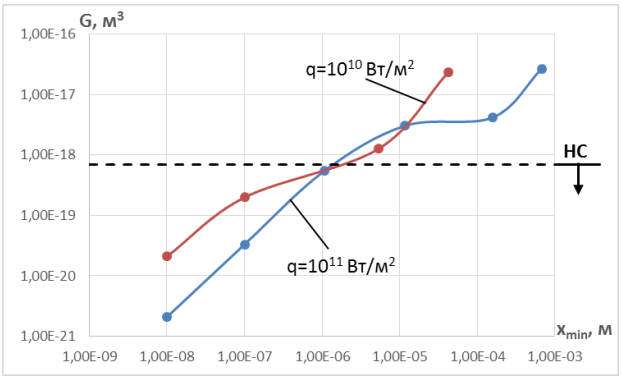


а

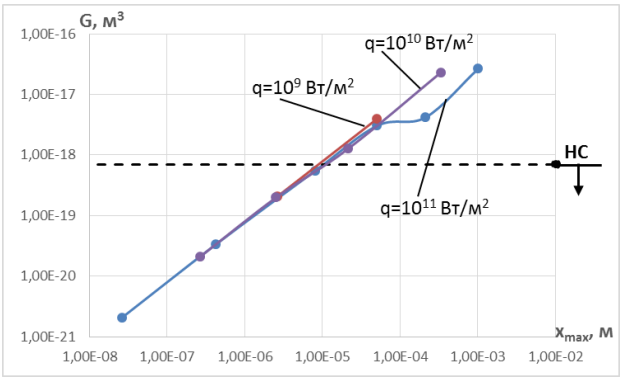


б

Рис. 4 – Зависимость объёма нанокластера $R=10^{-6}$ м от: а – минимальной; б – максимальной глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (материал «ВолКар»).



а



б

Рис. 5 – Зависимость объёма нанокластера $R=5\cdot10^{-7}$ м от: а – минимальной; б – максимальной глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (материал «ВолКар»).

Сравнение этих рисунков показывает, что во втором случае при $R=5\cdot10^{-7}$ м зона технологических параметров ЛИ расширена, т.е. при большем количестве технологических параметров есть возможность получения НС. Построенные зависимости позволяют выбирать предварительно технологические параметры, при которых возможна реализация НС.

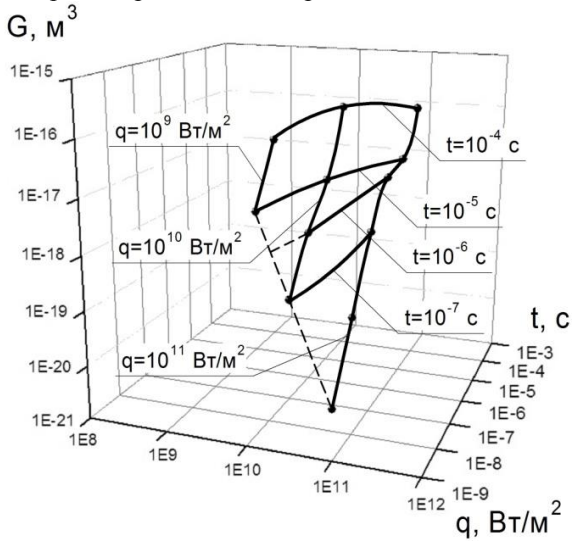


Рис. 6 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=10^{-6}$ м) (материал «ВолКар»)

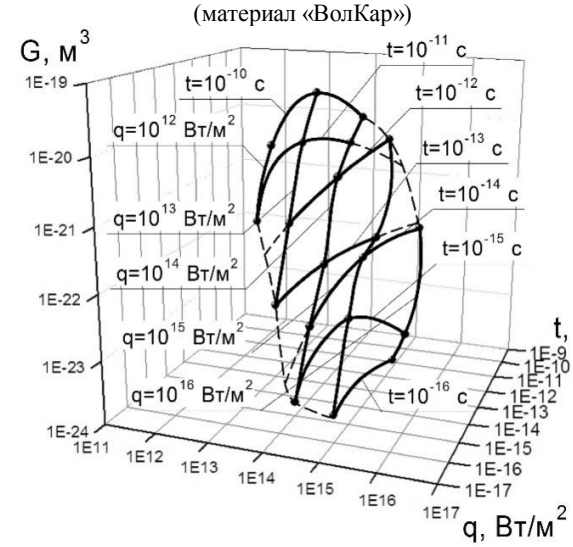


Рис. 7 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры ($R=5\cdot10^{-7}$ м) (материал «ВолКар»).

Выводы.

Выводы. Проведенные исследования показали реальную возможность получения наноструктур с помощью лазерной обработки твердого сплава ВолКар, причем можно выбирать с помощью экспресс-оценки предварительные технологические параметры и настройки лазера (размера пятна) для того, чтобы получить наноструктуры на определенной глубине, а изменяя технологические параметры заполнить полностью наноструктурами довольно-таки значительный поверхностный слой детали (порядка 10^{-5} м). Это и позволит существенно повысить работоспособность и эффективность режущего инструмента из твердого сплава «ВолКар».

Список литературы

1. *Костюк Г. И.*, Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наносруктурными модифицированными слоями: Монография-справочник: в 2 кн./Г.И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. *Костюк Г. И.*, Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / *Г. И. Костюк*. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. *Костюк Г. И.* Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. – / *Г. И. Костюк*. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. *Костюк Г. И.* Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / *Г. И. Костюк*. – К.: Изд-во АИНУ, 2002.– Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий.–596 с.
5. *Костюк Г. И.* Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.
6. *Костюк Г. И.* Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. − Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
7. *Костюк Г. И.* Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб.пособие / *Г. И. Костюк*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
8. *Костюк Г. И.* Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / *Г. И. Костюк*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
9. *Костюк Г. И.* Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: справ. / *Г. И. Костюк*. – К.: Вид-во АІНУ, 2003. – 412 с.
10. *Костюк Г. И.* Физико-технические основы роботизированного производства [Текст]: учеб.пособие / *Г. И. Костюк*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.
11. *Гречихин Л. И.* Физика наночастиц и нанотехнологий [Текст] / *Л. И. Гречихин*. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
12. *Гусев А. И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / *А. И. Гусев*. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
13. *Узунян М.Д.* Шлифование наноструктурных твёрдых сплавов [Текст]: учеб.пособие / *М.Д. Узунян, Р.М. Стрельчук*. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2015. – 182 с. – На рус.яз.
14. *Андриевский Р.А.* Наноструктурные материалы [Текст]: учеб.пособие / *Р.А. Андриевский, А.В.Рагуля*. – М.: Издательский центр «Академия»», 2005. – 117 с.
15. *Добротворский С. С.* Энергетический подход к определению технологических режимов при высокоскоростной обработке / *С. С. Добротворский, А.К. Мялица, Е.В. Басова [и др.]* // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Харьков : НАУ "ХАИ", 2014. – № 65. – С. 69-74.

Bibliography (translitered)

1. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem*: sprav [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur*: monogr [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i up-*

rochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. 596 p.

5. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Reference for calculation of the main physical and technological parameters, assessing opportunities, selecting the type of technologies and equipment]. 482 p.
6. Kostyuk, G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2009. 406 p.
7. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy:* ucheb.posobiye [The scientific basis for the creation of modern technologies] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2008. 552 p.
8. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2007. 633 p.
9. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, AÍNU, 2003. 412 p.
10. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva* [Physical and technical bases of robotized production] – Kharkov, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2006. – 614 p.
11. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologiy* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
12. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
13. Uzunyan M.D., SHlifovanie nano-strukturnyh tvyordyh splavov [Tekst]: ucheb.posobie Kharkov. NTU «KHPI», 2015. – 182 pp.
14. Andrievskij R.A., Nanostruk-turnye materialy [Tekst]: ucheb.posobie – Moscow. Akademiya. 2005. 117 p.
15. *Dobrotvorskyyi S. S., Mialytsa A.K., Basova E.V.* Energeticheskij podxod k opredeleniyu texnologicheskix rezhimov pri vysokoskorostnoj obrabotke [Energy approach to the definition of technological regimes in HSM]. Kharkov, Nats. aero-kosm. un-t «Khark. aviats. in-t », 2014, No 65, pp. 69-74.

Поступила (received) 10.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Перспективы применения лазерной обработки для создания наноструктур на ри из «ВолКар» / Г. І. Костюк, Ю.В. Широкій // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – №26 (1248). – С. 60–65. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

Перспективы применения лазерной обработки для создания наноструктур на ри из «ВолКар» / Г. И. Костюк, Ю.В. Широкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 60–65. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

Prospects of using laser processing to create nanostructures on the Rie from «VolKar» / G. Kostyuk, Yu Shirokyy// Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.60–65. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Генадій Ігорович **–** доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Костюк Геннадий Игоревич – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennadiy Igorevich **–** Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovsky, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Широкий Юрий Вячеславович – доцент, кандидат технических наук Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Широкий Юрій В'ячеславович - доцент, кандидат технічних наук Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.Є. «ХАІ», тел .: (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Shirokiy Yuri Vyacheslavovich - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel .: (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

УДК 621.923.7

А.Н. ШЕЛКОВОЙ, А.А. КЛОЧКО, М.И. ГАСАНОВ, Д.А. КРАВЧЕНКО, О.А. АНЦЫФЕРОВА

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ИМИТАЦИОННОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

У статті викладені функціональні аспекти імітаційної моделі формування похибок при зубообробки лезовий інструментом. Розглянуто підхід до прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс (ЗК), що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки і методі статистичного математичного моделювання методом Монте-Карло. Розроблено загальну модель формування ЗК при механічній обробці, геометрична інтерпретація якої є результат перетину просторових множин, які утворюються за принципом суперпозиції в результаті імітаційного підсумовування векторів елементарних складових технологічних похибок. Формування моделі у вигляді комплексу формальних методів і алгоритмів дозволяє автоматизувати процес дослідження. Розроблено алгоритм забезпечення інтелектуальних засобів вимірювальних систем. (Ініс) і методика визначення конструкції черв'ячних зуборізних фрез.

Ключові слова: імітаційна математична модель, зубофрезерованіяе, похибки, принцип суперпозиції, векторному метод Монте-Карло, просторові безлічі, принцип суперпозиції, комплекс формальних методів, інтелектуальні засоби, вимірювальні сістемиіка визначення конструкції черв'ячних зуборізних фрез.

В статье изложены функциональные аспекты имитационной модели формирования погрешностей при зубообработке лезвийным инструментом. Рассмотрен подход к прогнозированию погрешностей механической обработки зубчатых колес (ЗК), базирующийся на принципах суперпозиции, векторном характере составляющих погрешности и методе статистического математического моделирования методом Монте-Карло. Разработана общая модель формирования ЗК при механической обработке, геометрическая интерпретация которой есть результат пересечения пространственных множеств, которые образуются по принципу суперпозиции в результате имитационного суммирования векторов элементарных составляющих технологических погрешностей. Формирование модели в виде комплекса формальных методов и алгоритмов позволяет автоматизировать процесс исследования. Разработан алгоритм обеспечения интелектуальных средств измерительных систем. (ИнИС) и методика определения конструкции червячных зуборезных фрез.

Ключевые слова: имитационная математическая модель, зубофрезерованияе, погрешности, принцип суперпозиции, векторном метод Монте-Карло, пространственные множества, принцип суперпозиции, комплекс формальных методов, интелектуальные средства, измерительные системы.

The article describes the functional aspects of the simulation model for the formation of errors in the machining of a blade tool. The approach to the prediction of errors in the machining of gears (ZK) based on the principles of superposition, the vector nature of the components of the error, and the method of statistical mathematical modeling by the Monte Carlo method is considered. A general model for the formation of ZA during machining is developed, the geometric interpretation of which is the result of intersection of spatial sets that are formed on the principle of superposition as a result of the simulation summation of the vectors of the elementary components of technological errors. The model takes into account the processing features due to the following factors: the actual shape of the cutting edges (cutting scheme, type of worm); Angles of installation of the milling cutter, tilting of the flute grooves, lifting of the milling cutters; Number of cutters and rods; The angle of inclination and the number of teeth of the wheel, etc. Formation of the model in the form of a complex of formal methods and algorithms allows to automate the research process. An algorithm for providing intelligent means of measuring systems has been developed. (InIS) and a technique for determining the design of worm gear cutters.

Key words: Imitation mathematical model, hobbing, errors, superposition principle, vector Monte Carlo method, spatial sets, superposition principle, complex of formal methods, intellectual tools, measuring systems for determining the design of worm gear cutters.

Постановка проблемы. Отличием реального формообразования от номинального (идеального) является наличие отклонений геометрии реальных профилей от номинальных. Основными конечными задачами, которые должны быть решены при исследовании закономерностей реального формообразования, являются задачи прогнозирования с заданной достоверностью возникающих погрешностей, а также задачи управления, в том числе оптимального этими погрешностями **[1, 2]**.

Анализ последних исследований. Рассматрим подход к прогнозированию погрешностей механической обработки зубчатых колес (ЗК), базирующийся на принципах суперпозиции, векторном характере составляющих погрешности и методе статистического математического моделирования методом Монте-Карло, , основанном на получении значительного числа реализаций стохастического процесса, который формируется таким образом, чтобы его вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи

В соответствии с действующим ГОСТ1643-81 погрешности зубчатых колес для обеспечения уровня точности должны быть не ниже, чем требуемая и могут быть сформулированы в виде (1)

$$EIi \le f\Delta i(\alpha) \le ESi, \qquad (1)$$

где $f\Delta i(\alpha)$ - функция зависимости i –ой погрешности зубчатого колеса (ЗК) от фазового угла реального профиля зубчатого колеса (α);

ESi - минимальное значение i – ой погрешности;

EIi - максимальное значение i – ой погрешности.

Таким образом, требования к точности изготовления зубчатого венца по обеспечению, к примеру, кинематической точности должны состоять из ограничений на радиальное биение и колебание длины общей нормали (согласно ГОСТ 1683-81) и двух функциональных зависимостей радиального биения и колебания длины общей нормали от фазового угла поворота ЗК (2) и (3)

$$EIFrr \le fFrr(\alpha) \le ESFrr, \qquad (2)$$

$$EIFwr \le fFwr(\alpha) \le ESFwr. \qquad (3)$$

Цель работы. Таким образом, согласно изложенному выше возникает потребность в получении функциональных зависимостей погрешностей ЗК от фазового угла поворота ЗК.

Анализ механизмов формирования погрешностей ЗВ свидетельствует о том, что элементарные погрешности технологических систем операций зубообработки характеризуются случайными числовыми

© А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Д.А. Кравченко, О.А. Анцыферова, 2017

характеристиками, определяющими величину и характер вхождения в соответствующие комплексные составляющие, которые, в свою очередь, взаимодействуя между собой, определяют исследуемые погрешности ЗК.

Основной материал. Так как исследуемые погрешности обработки возникают в результате воздействия ряда случайных факторов, характеристики которых, в зависимости от уровня сложности структурного строения погрешностей, являются величинами или функциями, носящими случайный характер проявления, их определение возможно с использованием методов теории вероятностей.

В соответствии с этим, для решения данной задачи, с целью повышения объективности получаемой информации, экономии временных и материальных затрат, наиболее целесообразным представляется применение методики статистического моделирования (метода Монте-Карло).

Исходя из изложенного выше разработана общая модель формирования ЗВ при механической обработке, геометрическая интерпретация которой показана на рис. 1.

Согласно предложенной модели, профиль изделия при механической обработке есть результат пересечения пространственных множеств А и В (4)

$$C = A + B. \quad (4)$$

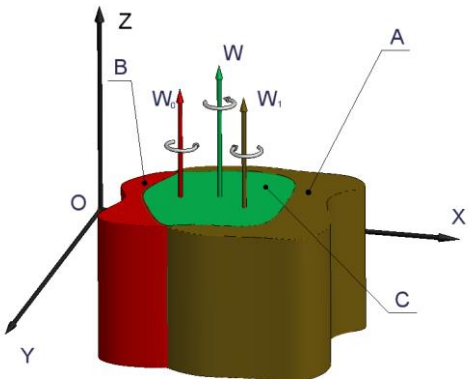


Рис. 1 – Общая модель формирования ЗК при механической обработке: *A* – пространственный профиль обрабатывающего контура; *B* – пространственный профиль обрабатываемого контура; *C* – пространственный профиль образованного контура изделия; *W0* – ось концентрации обрабатываемого контура; *W1* – ось концентрации обрабатывающего контура; *W* – ось концентрации образованного контура изделия

Пространственные же множества образуются по принципу суперпозиции в результате имитационного суммирования векторов элементарных составляющих технологических погрешностей.

Для построения расчетной схемы статистического моделирования стохастической модели элементарные технологические погрешности разбиваются на три вида: погрешности, сдвигающие ЗК в плоскости обработки и тем самым создающие геометрический эксцентриситет, перекашивающие погрешности, создающие перекос плоскости обработки ЗК и погрешности, проворачивающие плоскость обработки и создающие кинематический эксцентриситет [2, 3, 4].

Далее, согласно расчетной схеме (рис. 2) моделирование погрешности обработки ЗК выполняется на основе расчета кинематическогоэксцентриситета проходит в 2 этапа:

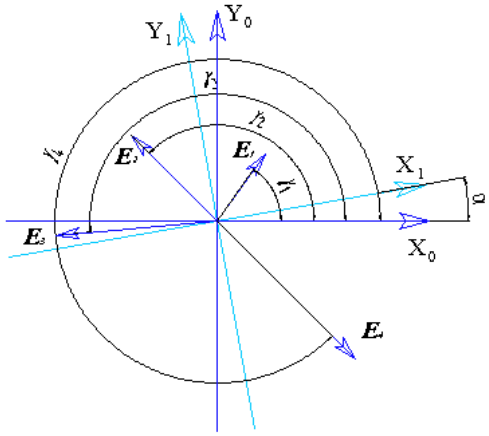


Рис. 2 – Расчетная схема кинематического эксцентриситета погрешности обработки ЗК

1. Производится моделирование положения ЗК в станочной системе:

а) моделируется скалярное значение вектора j-ой технологической погрешности $m(E_j)$, который будет рассчитываться по (5), если погрешность распределена в соответствии с законом равной вероятности

$$m(E_j) = R_{[0;1]} E_j. \quad (5)$$

где *m(Ej)* – моделируемое значение элементарной составляющей погрешности;

R[0,1] – равномерно распределенная на интервале [0,1] случайная величина;

Ej - величина элементарной составляющей погрешности по (6) при любом другом виде закона распределения *Ej*

$$\int_{-\infty}^{m(E_j)} f(E_j)\,dE = R_{[0,1]}, \quad (6)$$

где *f(Ej)* – функция плотности вероятности распределения случайной величины элементарной составляющей погрешности.

При этом необходимо, чтобы смоделированная случайная величина *m(Ej)* по вероятности (при n → ∞) сходилась к искомой величине *Ejr*, т.е. для любого бесконечно малого ε > 0 должно выполняться соотношение (7)

$$\lim_{m\to\infty} P\left[\sum_{i=1}^{m}\left(m(E_j) - E_{jr}\right)_m < \varepsilon\right] = 1, \quad (7)$$

где *P* – соответствующая вероятность;

m – количество смоделированных значений;

Ejr - искомая (реальная) величина элементарной составляющей погрешности;

б) моделирование угловых положений векторов *Qj* (рис. 3)

$$m(\gamma_j) = R_{[0;1]} 360^0 = R_{[0;360^0]}, \quad (8)$$

где *R[0,1], R[0,360°]* – соответственно равномерно распределенная на интервалах *[0,360°], [0,1]* случайные величины;

m(γj) – моделируемое значение угла поворота вектора j–й составляющей погрешности.

Для моделирования обработки ЗК: выполняется поворот осей координат на угол α и тем самым воспроизводится движение обката, возникающее при обработке ЗК. При этом эксцентриситет *E* (сдвиг плоскости обработки ЗК) равен сумме проекций всех эксцентриситетов на ось X (9)

$$E(\alpha)=\sum_{j=1}^{m}\left(E_j\cos\left(\gamma_j-\alpha\right)\right). \qquad (9)$$

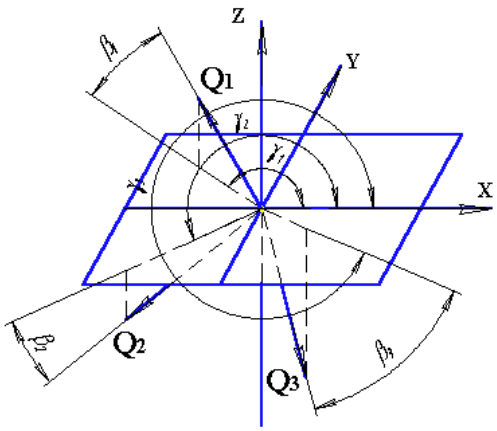


Рис. 3 – Расчетная схема перекоса плоскости обработки ЗК: *Qj* нормальные вектора плоскостей перекоса; *β* и *γ* углы, характеризующие их положение в пространстве относительно плоскости обработки ЗК.

Тем самым, произведя полный оборот координатных осей от 0° до 360°, получим функциональную зависимость эксцентриситета от фазового угла поворота зубчатого колеса E(α), (рис 4, *а*).

Расчет суммарного перекоса плоскости обработки *Q* производится по схеме, представленной на рис. 3.

Суммарный перекос определяется аналогично моделированию эксцентриситета:

1. Производится моделирование положения ЗК в станочной системе:

а) моделируется скалярное значение нормального вектора *j-й* плоскости перекоса по аналогии с (5 ÷ 7);

б) моделируется угловоех положений этих векторов $m(\gamma_j)$ и $m(\beta_j)$ по (10 и 11)

$$m\left(\gamma_j\right)=R_{[0;1]}360^0, \qquad (10)$$

$$m\left(\beta_j\right)=R_{\left[-90^0;90^0\right]}, \qquad (11)$$

где *R[0, 360°], R[0,1], R[-900, 900]* – соответственно равномерно распределенная на интервалах *[0,360°], [0,1], [−900,900]* случайные величины;

m(γj), m (βj) – моделируемые значения характеристических углов j–го технологического перекоса.

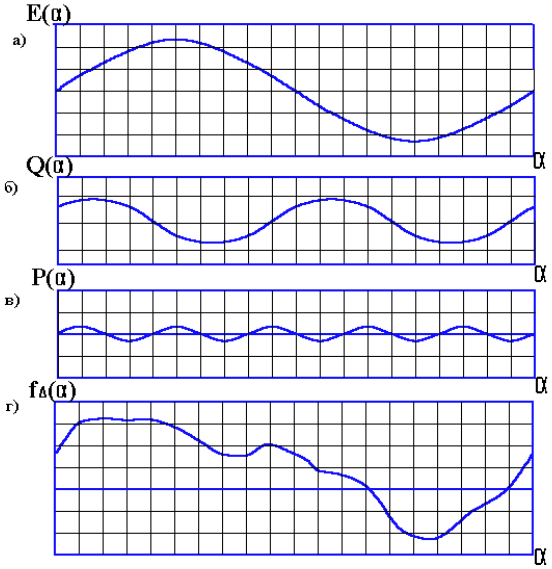


Рис. 4 – Схема формирования функциональной зависимости погрешностей венца *(E, Q, P, fΔ)* от фазового угла поворота ЗК

Перекос плоскости обработки приводит к возникновению вертикальной $Q_B(\alpha)$ и горизонтальной $Q_Г(\alpha)$ составляющих погрешности профиля ЗК (12 и 13)

$$Q_B(\alpha)=\sum_{j=1}^{m}\left(Q_j\sin\left(\beta_j\right)\cos\left(\gamma_j-\alpha\right)\right), \qquad (12)$$

$$Q_Г(\alpha)=\sum_{j=1}^{m}\left(Q_j\cos\left(\beta_j\right)\cos\left(\gamma_j-\alpha\right)\right). \qquad (13)$$

Если исследуемая погрешность носит радиальный характер, тогда *Q* равна *QГ*.

Тем самым, произведя полный оборот координатных осей от 0° до 360° получим функциональную зависимость перекоса *Q* от фазового угла поворота зубчатого колеса, (рис. 4, *б*).

Моделирование третьего типа погрешностей происходит следующим образом:

1. Выполняется моделирование значения погрешности *Pj* согласно (4 ÷ 6).

2. Выполняется моделирование начального фазового угла (14)

$$m\left(\varphi_j\right)=R_{[0,1]}\frac{\pi}{2}=R_{\left[0,\frac{\pi}{2}\right]}. \qquad (14)$$

3. Выполняется моделирование обработки ЗК (15)

$$P(\alpha)=\sum_{j=1}^{m}\left(P_j\cos\left(\varphi_j+\alpha T\right)\right), \qquad (15)$$

где *T* – период колебаний *T= 2π/z*;

z – число зубьев исследуемого ЗК.

Таким образом, произведя полный оборот координатных осей ЗК от 0° до 360° получим функциональную зависимость кинематического эксцентриситета *P* от фазового угла α поворота зубчатого колеса (рис. 4, *в*).

Пользуясь принципом суперпозиции, получим функциональную зависимость погрешности венца от

фазового угла поворота ЗК (16).

$$f\Delta(\alpha) = E(\alpha) + Q(\alpha) + P(\alpha). \quad (16)$$

Пример результатов моделирования представлен на (рис 4, *г*).

Проведенный анализ априорных представлений об объекте моделирования позволил выделить наиболее значимые информативные параметры процесса обработки [3, 5, 6].

Известно, что специфика червячного зубофрезерования состоит в том, что характер динамических параметров обработки в значительной степени обуславливается изменением во времени геометрических и кинематических характеристик (толщин срезаемых слоев и величин кинематических передних и задних углов для всех точек периметра режущих кромок всех работающих зубьев червячной фрезы), (17)

$$\overline{D}_t = \sum_{i=1}^{z_0}\sum_{j=1}^{z_i}\int_L \overline{D}(a_l, \alpha_l, \gamma_l)dl, \quad (17)$$

где *Dt* – вектор динамических параметров процесса обработки;

z_0 – число реек червячной зуборезной фрезы;

z_i – число зубьев *i-й* рейки фрезы;

a_i – мгновенная толщина срезаемого слоя в рассматриваемой точке режущей кромки;

γ_l и α_l – мгновенные значения кинематических переднего и заднего углов для рассматриваемой точки;

L – параметр режущей кромки.

Задача структурной и параметрической идентификации моделей вида (17) по экспериментальным данным является задачей чрезвычайно большой размерности, не имеющей единственного решения. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования (в частности, работы В. Н. Башкирова, K. Ziegler, G. Sulzera и др.) свидетельствуют о наличии значимой монотонной связи между площадью слоя, срезаемого зубьями фрезы, и динамическими параметрами процесса обработки.

В качестве интегральной характеристики состояния процесса обработки, как правило, используется мгновенная площадь слоя Ft, срезаемого каждым из зубьев фрезы. Тогда модель (17) представляется в виде (18)

$$F_t = \sum_{i=1}^{z_0}\sum_{j=1}^{z_i}\int_L a_l dl. \quad (18)$$

Характер связи между параметрами $\overline{D}_t$ и *Ft* позволяет предположить наличие аналогии между представлениями этих сигналов в частотной области. Кроме того, разработанные методы позволяют определить мгновенные значения α_l, γ_l и αl для любой точки любого зуба фрезы.

В модели учтены особенности процесса обработки, обусловленные следующими факторами: фактической формой режущих кромок (схемой резания, типом червяка); углами установки фрезы, наклона стружечных канавок, подъема витков фрезы; числом заходов и реек фрезы; углом наклона и числом зубьев колеса и т.д. Формирование модели в виде комплекса формальных методов и алгоритмов позволяет автоматизировать процесс исследования.

Метод и алгоритм построения математической модели червячной зуборезной фрезы. Режущая кромка зуба фрезы представляется плоским «примитивом» - упорядоченным списком точек плоскости, заданных их координатами в системе координат (СК) *ХкУк*, связанной с зубом фрезы (рис. 5).

Количество типов примитивов зависит от схемы резания червячной фрезы, количество точек в каждом из примитивов определяется конструкцией фрезы и заданной точностью описания [3, 5, 6]. Червячная зуборезная фреза представляется «комплектом примитивов», количество и пространственное размещение, которых в СК фрезы *XqYqZq* определяется типом и конструкцией фрезы (рис. 5). Размещение модели фрезы в СК *XZYZZZ*, связанной с заготовкой (рис. 6), производится на основе метода первоначального позиционирования и заключается в назначении начальных координат центра СК *XqYqZq* в СК *XZYZZZ*.

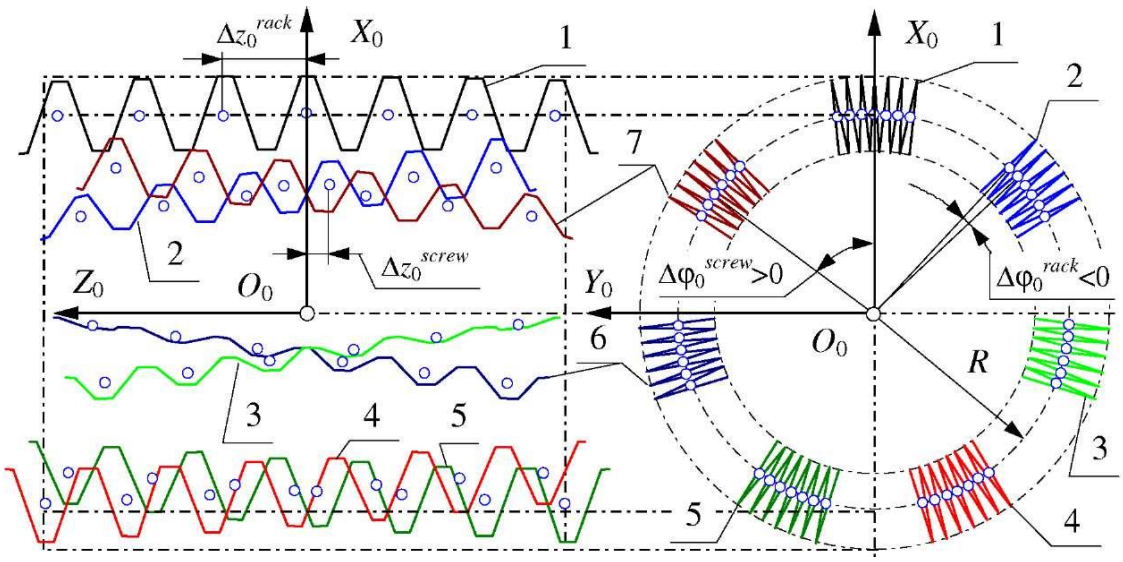


Рис. 5 – Графическое представление математической модели двухзаходной правозаходной червячной зуборезной фрезы

Моделирование перемещения фрезы осуществляется посредством «алгоритма прямой трассировки зубьев». Для этого введены понятия «передаточное отношение фреза – заготовка (i_{01})» и «квант перемещения фрезы в результате главного движения резания, движений обката и подач $(\Delta\varphi_0)$» (19)

$$\begin{cases} i_{01} = -sign(\gamma_{m0})\left[\dfrac{z_1}{n_{z0}} - \dfrac{S_{02}}{2\times\pi\times R\times tg(\gamma_{R0})}\right]\times\left[1 - sign(\gamma_{m0})\times\dfrac{S_{01}\sin(\beta)}{z_1\times\pi\times m}\right], \\ \Delta\varphi_0 = -\dfrac{2\pi}{n_{hob}}, \Delta\varphi_Z = \dfrac{\Delta\varphi_0}{i_{01}}, \Delta S_{01} = S_{01}\left|\dfrac{\Delta\varphi_Z}{2\pi}\right|, \Delta S_{02} = S_{02}\left|\dfrac{\Delta\varphi_Z}{2\pi}\right|, \Delta S_{03} = S_{03}\left|\dfrac{\Delta\varphi_Z}{2\pi}\right|. \end{cases} \quad (19)$$

где m – модуль;

i_{01} – передаточное отношение «фреза-заготовка»;

$Z1$ – число зубьев колеса; nz_0 - число заходов фрезы;

R – радиус, на котором расположены центры примитивов (в частном случае $R=dm0/2$, $dm0$ – средний расчетный диаметр фрезы);

γ_{m0} – угол подъема витков фрезы на цилиндре радиуса R;

β – угол наклона зубьев колеса;

S_{01} - подача фрезы в направлении оси заготовки (встречная/попутная);

S_{02} – осевая подача фрезы;

S_{03} – радиальная подача;

n_{hob} – число «тактов моделирования» на оборот фрезы.

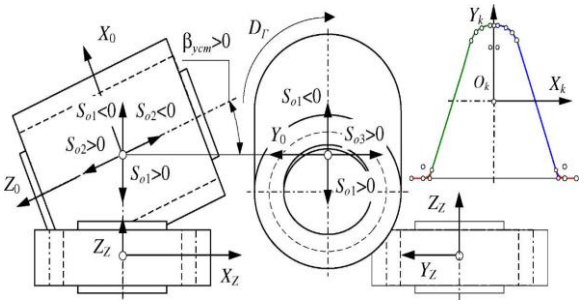


Рис. 6 – Системы координат и соглашения о знаках движений подачи

Кванты перемещений $\Delta\varphi 0$, $\Delta\varphi\zeta$, ΔS_{0l}, ΔS_{o2}, ΔS_{o3} в дальнейшем используются для определения положений зубьев фрезы в СК, связанной с заготовкой, на любом такте моделирования q.

Метод оценки мгновенного состояния процесса обработки основан на восстановлении формы поверхности, обрабатываемой каждым из зубьев фрезы в каждый из моментов времени. Для восстановления формы обрабатываемой поверхности используются функциональные зависимости (ФЗ), определяющие «траектории обратной трассировки» зубьев - гладкие пространственные кривые, по которым зубья, формировавшие обрабатываемую поверхность («kz - прошедшие» зубья), приближались к тому положению, которое они заняли на рассматриваемом такте моделирования (рис. 7).

ФЗ обратной трассировки представляю собой векторные функции вида $G_z^{\tau}(i, j, q, k_z, \tau)$, моделирования q, где $G_z^{\tau}(\,)$ - вектор координат центра k_z - прошедшего примитива в СК $XZYZZZ$, q – индекс такта моделирования, τ – «глубина обратной трассировки».

Для выбора единственного положения каждого из kz - прошедших примитивов, представляющих обрабатываемую поверхность, используется критерий минимизации евклидовой метрики (6.20) как функции глубины трассировки τ.

$$R(i, j, q, k_z, \tau) = Gz(i, j, q, 0), G_{\tau}\zeta(i, j, q, k_z, \tau), \quad (20)$$

где $G_z(i, j, q, 0)$ - вектор координат в СК $XZYZZZ$ центра рассматриваемого примитива на такте моделирования q;

T_k - траектория обратной трассировки центра примитива κ_z - прошедшего зуба.

Применение такого подхода позволет построить операциональное определение слоя срезаемого рассматриваемым зубом фрезы $[S_{i,j}]_q$ на заданном такте моделирования q, в форме геометрического отношения, заданного на рассматриваемоми «оттрассированных» примитивах $[P_{i,j}]_q$ (21):

$$[S_{i,j}]_q = D_{a1} \cap \left[[P_{i,j}]_q - [P_{i,j}]_q \cap \left[\cup\left[\underset{k_z=1}{\overset{k_{z0}}{T}}[P_{i-k_z,j}]_q\right]\right]\right], \quad (21)$$

где T - оператор обратной трассировки $[P_{i-k_z,j}]_q$ - прошедшего примитива;

K_{z0} - цикл схемы резания;

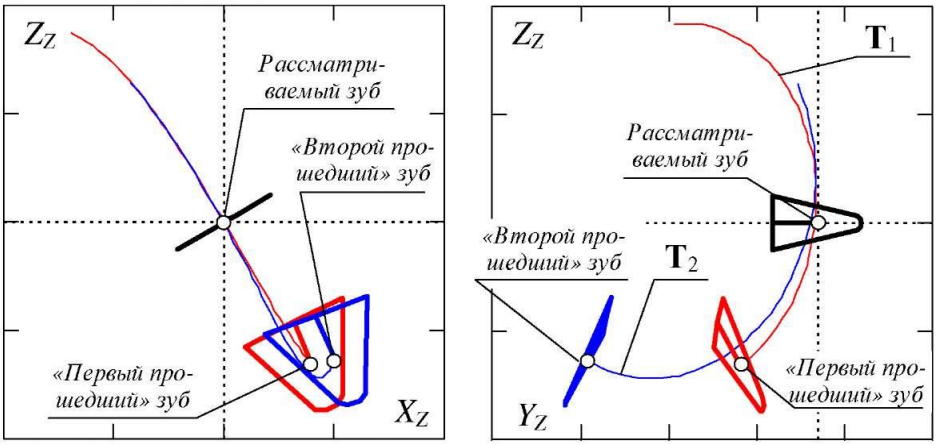


Рис. 7 – Траектории обратной трассировки «прошедших» зубьев

D_{a1} - фигура, образованная рассечением тела заготовки плоскостью рассматриваемого примитива.

Т.е. (15) – оценка мгновенной площади слоя, срезаемого любым зубом фрезы на заданном такте моделирования q. Для реализации метода расчета по (21), разработаны следующие алгоритмы (рис. 8)

Алгоритм определения глубины обратной трассировки τ, доставляющей минимум функции $R(i, j, q, k_z, \tau)$.

«Алгоритм отсечения», который используется для выделения и удаления участков примитивов, находящихся вне тела заготовки.

Алгоритм перевода оттрассированного примитива в систему координат рассматриваемого примитива.

Алгоритм построения пересечения и объединения плоских фигур, заданных списками точек .

Алгоритм определения площади плоской фигуры. Метод, основанный на использовании ФЗ обратной трассировки, позволяет также восстанавливать форму поверхности, обработанной на обороте заготовки, предшествовавшем рассматриваемому. Все разработанные алгоритмы объединены в общем алгоритме обратной трассировки зубьев и могут использоваться также (кроме алгоритма определения площади) для определения иных (помимо мгновенной площади срезаемого слоя) мгновенных геометрических параметров процесса обработки (γ_l, α_l).

Имитационная математическая модель (ИММ) процесса обработки представляет собой комплекс формальных методов и реализующих их алгоритмов. ИММ позволяет с любой степенью детализации анализировать процесс обработки с точки зрения его геометрических закономерностей, рис. 8.

Разработка алгоритмического обеспечения интеллектуальных средств измерительных систем (ИнИС). На рис. 9 представлена общая структура алгоритмического обеспечения ИнИС. Она применяется для формирования динамической системы частотных фильтров $\{H(f)\}$, использующихся для численного выделения системы информативных параметров процесса обработки $\left\{\left[\phi(t_j)\right]_{\Delta i\phi}\right\}$ на фоне шумов.

Разработаны оптимальные конструкции червячных зуборезных фрез и выполнена оптимизация схемы резания по критерию разделения «П-образных» слоев зубьями фрезы, критичными с точки зрения износа.

Применение ИММ геометрических параметров процесса зубофрезерования является средством сокращения объемов длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований [4, 5].

На основе приведенных моделей выполнена оптимизация технологических операций зубофрезерования по критерию равномерной загрузки зубьев фрезы (оптимизация величины осевых перестановок, рациональное использование диагональной подачи). Проверка адекватности модели проводится путем анализа сигналов площади срезаемого слоя (рис. 10) и сигналов окружной силы резания, полученных экспериментальным путем и путем моделирования.

Основные методы и алгоритмы моделирования реализованы в рамках программного комплекса, который включает в себя модули расчета и моделирования эвольвентных зубчатых передач, червячных зуборезных фрез и зубофрезерных операций.

Рис. 8 – Схема разработанных методов и алгоритмов моделирования обработки ЗК

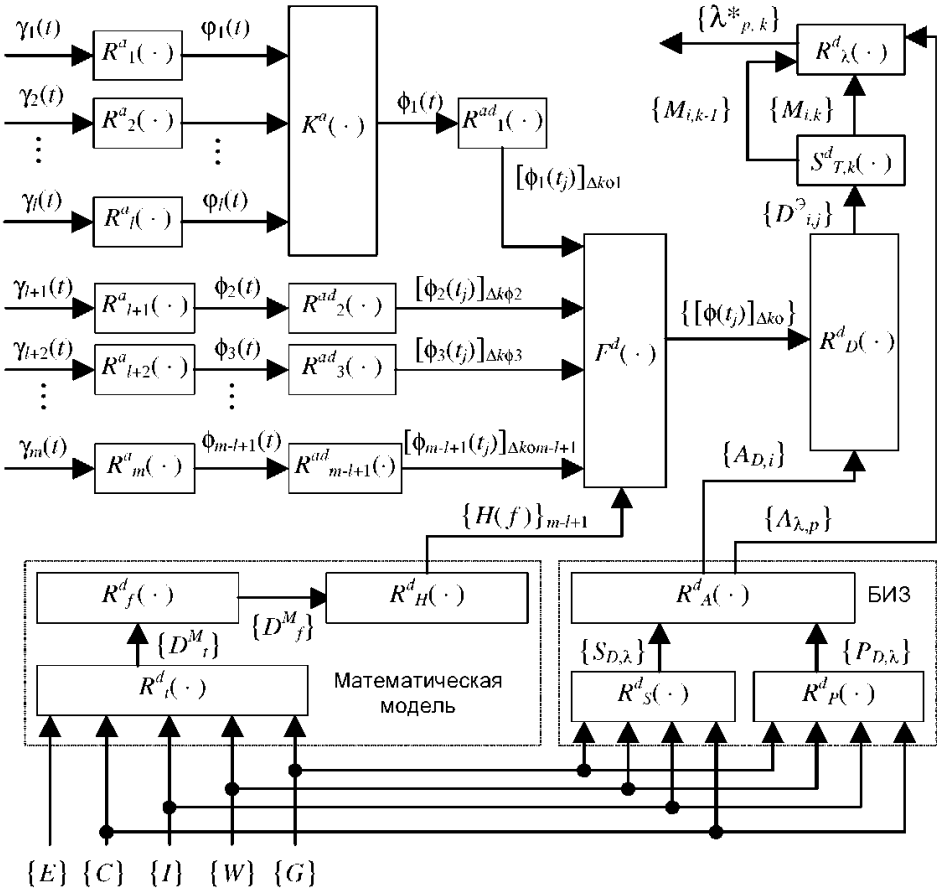


Рис. 9 – Структура ИнИС косвенных измерений динамических параметров процесса червячного зубофрезерования

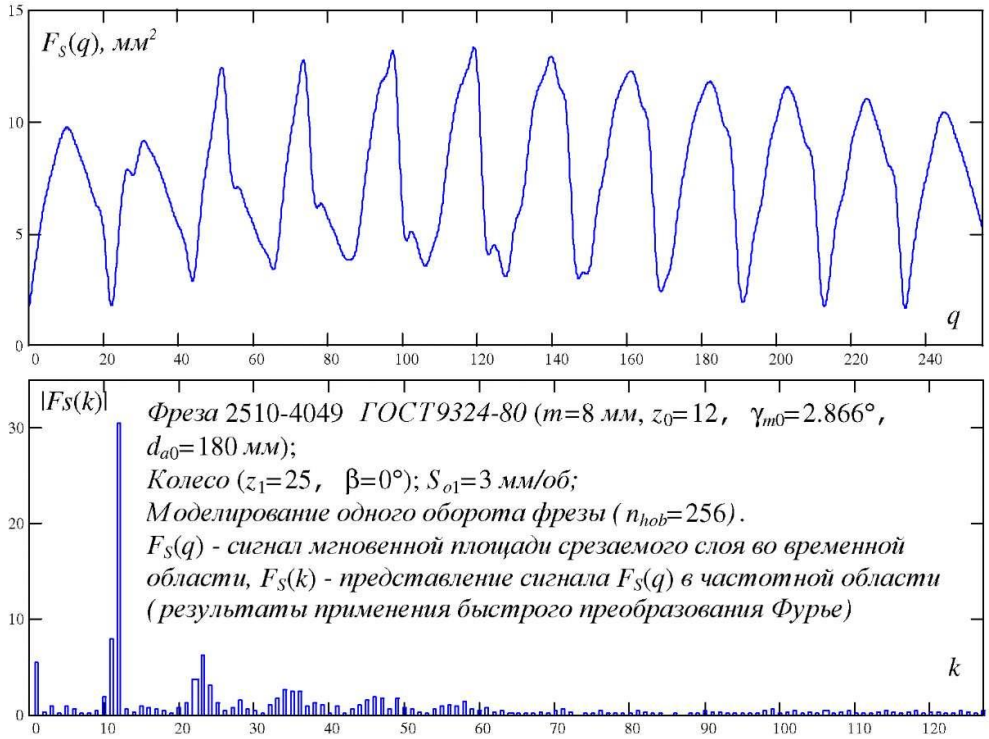


Рис. 10 – Представление во временной и частотной области сигнала мгновенной площади срезаемого слоя

В то же время, модель обработки ЗК на основе ИММ не может быть непосредственно использована для исследования процесса зубофрезерования, для моделирования обработки фрезами, имеющими за-

борный конус или криволинейную образующую.

Виводы. Разработана общая модель формирования ЗК при механической обработке, геометрическая интерпретация которой есть результат пересечения пространственных множеств, которые образуются по принципу суперпозиции в результате имитационного суммирования векторов элементарных составляющих технологических погрешностей.

В модели учтены особенности процесса обработки, обусловленные следующими факторами: фактической формой режущих кромок (схемой резания, типом червяка); углами установки фрезы, наклона стружечных канавок, подъема витков фрезы; числом заходов и реек фрезы; углом наклона и числом зубьев колеса и т.д. Формирование модели в виде комплекса формальных методов и алгоритмов позволяет автоматизировать процесс исследования.

Метод оценки мгновенного состояния процесса обработки основан на восстановлении формы поверхности, обрабатываемой каждым из зубьев фрезы в каждый из моментов времени. Для восстановления формы обрабатываемой поверхности используются функциональные зависимости (ФЗ), определяющие «траектории обратной трассировки» зубьев - гладкие пространственные кривые, по которым зубья, формировавшие обрабатываемую поверхность, приближались к тому положению, которое они заняли на рассматриваемом такте моделирования.

Имитационная математическая модель (ИММ) процесса обработки представляет собой комплекс формальных методов и реализующих их алгоритмов. ИММ позволяет с любой степенью детализации анализировать процесс обработки с точки зрения его геометрических закономерностей.

Разработан алгоритм обеспечения интелектуальных средств измерительных систем (ИнИС).

Разработаны оптимальные конструкции червячных зуборезных фрез и выполнена оптимизация схемы резания по критерию разделения «П-образных» слоев зубьями фрезы, критичными с точки зрения износа.

Применение ИММ геометрических параметров процесса зубофрезерования является средством сокращения объемов длительных и дорогостоящих экспериментальных исследований. На основе приведенных моделей выполнена оптимизация технологических операций зубофрезерования по критерию равномерной загрузки зубьев фрезы (оптимизация величины осевых перестановок, рациональное использование диагональной подачи).

Список літератури

1. *Равская Н.С.* Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / *Н.С. Равская, О.А. Охріменко, П.П .Мельничук, О.В. , Т.П. Ніколаєнко* // Навчальний посібник з грифом МОН України (лист №1/11-5203 від 12.03.2013), К.: Вид. СКД-Друк 2013. – 126 с.
2. *Шелковой А.* Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства /*А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока* // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720.
3. *Ю. В. Тимофее.* Технологические способы повышения точности зубофрезерования универсальными червячными фрезами / *Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ ХПІ, 2010. – № 25. – С. 134–141.
4. *Клочко А.А.* Применение высокоскоростных тяжелонагруженных зубчатых цилиндрических передач / *А.А.Клочко* // Научный Вестник ДГМА. – 2014. – № 2 (14Е). – С. 42–55. Режим доступу *http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№2(14E)_2014/nomer_2(14E)_2014.html*
5. Шелковий О.М. Логіко-лінгвістичне моделювання взаємозв'язку функціональних характеристик системи дрібносерійного виробництва з параметрами процесу складання / *О.М. Шелковий, О.О. Клочко, Л.Б. Шрон, А.О. Скоркін, О.Л. Кондратюк* // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. – Вып.67. – С. 94-100.
6. *Шелковой, А. Н.* Методика расчета параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес в зависимости от условий их обработки / *А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, Д. В. Ефремов, А. А. Клиновский* // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 157–173.

Bibliography (transliterated)

1. Ravskaya N.S., Okhrimenko O.A., Melnichuk P.P., Nykolayenko T.P. *Osnovy formoutvorennya poverkhon' pry mekhanichniy obrobtsi* /[Basis of formutvervoronya verhon in the case of mehanichnyi obrobtsi.]/ Navchalny posliobnik with the stamp of the Ministry of Education and Science of Ukraine (sheet No. 1 / 11-5203 dated 12.03.2013), K .: View. SKD-Druk 2013. - 126 p.
2. Shelkovoy A., Klochko A., Naboka E. *Imitacionnoe modelirovanie v zadachah mehanosborochnogo proizvodstva* [Simulation modeling in the tasks of mechanoassembly production].- Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 p., Ill. In Russian. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN: 9783659691720.
3. Timofeev Yu. V., Mironenko E. V, Klochko AA, Shapovalov VF, Mironenko OE. *Tehnologicheskie sposoby povyshenija tochnosti zubofrezerovanija universal'nymi chervjachnymi frezami* [Technological ways of increasing the accuracy of gear milling with universal worm mills] News of the National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute". - Khar'kov: NTU KhPI, 2010. - No. 25. – pp. 134-141 ..
4. Klochko A.A. *Primenenie vysokoskorostnyh tjazhelonagruzhennyh zubchatyh cilindricheskih peredach* [Application of high-speed heavy-duty gear-type cylindrical gears]. Scientific Herald of the DSEA. - 2014. - No. 2 (14E). - pp. 42-55. The access mode is http: //www.dgma.donetsk. Ua / science_ public / science_ vesnik / №2 (14E) _2014 / nomer_2 (14E) _2014.html
5. Shelkovy O.M. Klochko O.O., Shron L.B., Skorkin A.O., Kondratyuk O.L. *Lohiko-linhvistychne modelyuvannya vzayemozv"yazku funktsional'nykh kharakterystyk systemy dribnoseriynoho vyrobnytstva z parametramy protsesu skladannya* .[Logic-lingvistichnee modulyuvannya vzaimozvvyuku funktsionalnyh characteristics sistemi dribnoseriynogo virobnitsvva in the parameters of the storage process].Open information and computer integrated technologies: Sat. Sci. Tr. - H.: Nats. Aerospace. Univ., "KhAI", 2015. - Issue 67. - pp. 94-100.
6. Shelkovoy A.N.,Mironenko E.V., Klochko A.A., Efremov D.V., Klinovsky A.A. *Metodika rascheta parametrov sostojanija poverhnostnogo sloja zakalennyh krupnomodul'nyh zubchatyh koles v zavisimosti ot uslovij ih obrabotki [*Method of calculating the parameters of the state of the surface layer of hardened coarse-grained gears, depending on the conditions of their processing]. Tool reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 31. - pp. 157-173.

Поступила (received) 02.07.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / О.М. Шовковой, О.О. Клочко, М.І. Гасанов, Д.О. Кравченко, О.О. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технологіїу машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Біблиогр.: 6 назв. – ISSN 2079−004X.

Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Д.А. Кравченко, О.А. Анцыферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технологіїу машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Біблиогр.: 6 назв. – ISSN 2079−004X.

Functional aspects of simulation mathematical modeling of geometric parameters of the process of gear milling / A. Shelkovoy, A. Klochko, M. Gasanov, D. Kravchenko, O. Antsiferova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.66–74. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шелковой Александр Николаевич – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків;

Шелковой Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков;

Шелковой Александр Николаевич - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politehnichemkty Institute " Kharkiv**;**

Клочко Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: klochko21@rambler.ru .

Клочко Александр Александрович – доктор технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: klochko21@rambler.ru;

Klochko Alexander Alexandrovich - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politehnichemkty Institute " Kharkiv; tel .: (067) 936-36-64; e mail: klochko21@rambler.ru;

Гасанов Магамедемын Ісамагамедович – к.т.н., профессор, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків;

Гасанов Магамедэмин Исамагамедович – к.т.н., профессор, проректор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков;

Hasanov Magamedemin Isamagamedovich - Ph.D., professor, pro-rector of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov;

Кравченко Дмитро Олександрович – аспирант кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ;

Кравченко Дмитрий Александрович – аспирант кафедры компьютеризированных мехатронных систем, инструмент и технологии Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск;

Kravchenko Dmitry Alexandrovich - postgraduate student of the department of computerized mechatronic systems, tools and technologies of the Donbass State Machine-Building Academy, Kramatorsk;

Анциферова Олеся Олександрівна - аспірант кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків;

Анцыферова Олеся Александровна – аспирант кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков;

Antsyferova Olesya Aleksandrovna - post-graduate student of the department of engineering technology and metal cutting machines of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov.

УДК 621.9.044

Г.И. КОСТЮК, Е.В. ВОЛЯК, А.В. ЕВСЕЕНКОВА

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР НА СПЕЦИАЛЬНОМ ЧУГУНЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА

Показана можливість отримання наноструктур на спеціальному чавуні за рахунок дії фемтосекундного лазера, причому є можливість утворення наноструктур, як в зоні формування зерна, так і в шарах наноструктурних товщини, але більших розмірів зерен, ніж наноструктурні. Дана методика попередньої оцінки технологічних параметрів лазерного випромінювання в фемтосекундному часовому діапазоні, яка дозволяє виявити технологічні параметри для отримання наноструктур. Вона використовується для експрес-оцінки можливості отримання наноструктур.

Ключевые слова: фемтосекундний лазер, наноструктури, експрес-оцінка технологічних параметрів, нанозерно, нано шари.

Показана возможность получения наноструктур на специальном чугуне за счёт действия фемтосекундного лазера, причём есть возможность образования наноструктур как в зоне формирования зерна, так и в слоях наноструктурной толщины, но больших размеров зёрен больших, чем наноструктурные. Дана методика предварительной оценки технологических параметров лазерного излучения в фемтосекундном временном диапазоне, которая позволяет выявить технологические параметры для получения наноструктур. Она используется для экспресс-оценки возможности получения наноструктур.

Ключові слова: фемтосекундный лазер, наноструктуры, экспресс-оценка технологических параметров, нанозерно, нано слои.

Shown possibility obtaining nanostructures especially for cast iron due to the action femtosecond laser, there at those ability education nanostructures, as in the formative zone of grain, as in layers of nanostructured thickness, but larger than nanostructured. The technique of preliminary estimation of technological parameters of laser radiation in the femtosecond time range is given, which allows revealing technological parameters for obtaining nanostructures. It is used for rapid assessment of the possibility of obtaining nanostructures.

Keywords: femtosecond laser nanostructures rapid assessment process parameters nanograin nano layers.

Введение. Специальный чугун широко используется в гильзах цилиндров внутреннего сгорания, которые должны обеспечивать нужный коэффициент трения, высокую износостойкость (обеспечивается высокой микротвердостью), значительную теплостойкость и высокие прочностные характеристики. Всё это может быть достигнуто благодаря получению наноструктур (НС) в поверхностном слое чугуна. Получение НС на внутренней поверхности цилиндра возможно вследствие использования фемтосекундного лазера с подводом луча за счёт волоконной или оптической системы транспортировки луча. Всё выше изложенное говорит о перспективности и актуальности теоретического исследования получения НС в поверхностном слое чугуна вследствие действия лазерного излучения в фемтосекундном диапазоне времени.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса. Получение наноструктур при действии лазерного излучения посвящено незначительное количество работ, которые представленны в основном в монографии [1] да и то эти работы посвящены упрочнению режущего инструмента. Несмотря на то, что значительное число работ посвящено исследованию наноструктур [2-12] получение НС на чугунах не исследовалось.

Все это говорит о том, что исследование возможности получения НС на чугуне и тем более фемтосекундным лазером не проводилось (фемтосекундный лазер не применяется для получения наноструктур), а значит исследования возможности получения наноструктур фемтосекундным лазером, является важной и актуальной задачей.

Цели и задачи исследования

Для получения теплофизических и термомеханических характеристик специального чугуна проводились исследования химического состава чугуна (Дрон 3-М), оценивалось количественная доля химических элементов, содержащихся в материале, так дефрактограмма и состав его представлены на рис.1.

Видно, что основными элементами есть железо (как чистое, так и в виде карбидов) 96,01 %, кремний – 2,42 %, марганец – 1,36 %,хром – 0,21 %,а также присутствует не связный углерод (С) менее 0,01%. Проведенные предварительное исследование состава химических элементов в чугуне позволило уточнить теплофизические и термомеханические характеристики исследуемого материала в таблице 1 даны механические характеристики хромисто-кремневого чугуна, которые использовались в расчётах табл.1.

Теоретическое исследование позволяет получить поля температур и температурных напряжений, скоростей роста температурных напряжений от технологических параметров лазерной обработки.

© Г.И. Костюк, Е.В. Воляк, А.В. Евсеенкова, 2017

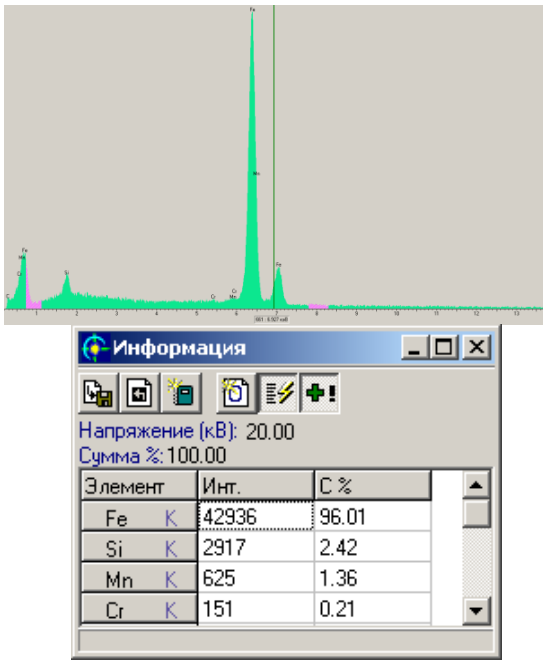


Рис.1 – Дифрактограмма и количественный состав основных элементов специального чугуна, полученная с использованием анализатора «Дрон 3-М»

Таблица1

Физико-механические характеристики хромисто-кремнистового чугуна (предел прочности и текучести, относительное удлинение, твердость НВ, модуль упругости Е, модуль сдвига G, коэффициент Пуассона μ)

Химический состав	$\sigma_{в,р}$ Н/м^2·10^{-7}	$\sigma_{т,раст}$ Н/м^2·10^{-7}	δ, %	НВ, кг/мм^2	Е·10^{-11}, Па	G_Y·10^{-11}, Па	μ
Cr (0,2-1%) Si (1,2-2%) C (~2,3%)	49-56	28-36	9-2.5	180-200	1.75	0.85	0.17

Применяя в качестве критериев получения НС: диапазон температур (500-1500 К), превышение 10^7 К/с скорости роста температуры, а также учитывается вероятность ускорения образования НС за счёт действия температурных напряжений $\sigma = 6\cdot10^7\ldots10^9$ Па и даже их образование при $\sigma > 10^{10}$ Па.

Результаты расчётов и их обсуждение. Проводилось исследование зависимостей максимальных температур, скоростей роста температур и температурных напряжений на различных глубинах от плотности теплового потока лазерного излучения (ЛИ) в фемтосекундном диапазоне для различных времён его действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10^{-16}$ с (рис.2 - 5) и от времени действия ЛИ (рис.6 - 8) при разных плотностях теплового потока: $q=10^{12}$ Вт/м^2; б - $q=10^{13}$ Вт/м^2; в - $q=10^{14}$ Вт/м^2; г - $q=10^{15}$ Вт/м^2; д - $q=10^{16}$ Вт/м^2.

Видно, что максимальная температура растет с увеличением плотности теплового потока. Для больших времён (10^{-10} с) НС образуется при плотностях теплового потока $q=10^{12}$ -10^{13} Вт/м^2, с уменьшением времени до 10^{-12} с и 10^{-13} с область образования НС перемещается в диапазон $q=10^{13}$ -10^{14} Вт/м^2, а для минимальных времён 10^{-14} с, 10^{-15}с и 10^{-16} с НС реализуется в основном в области тепловых потоков $q=10^{15}$ - 10^{16} Вт/м^2 (рис.2).

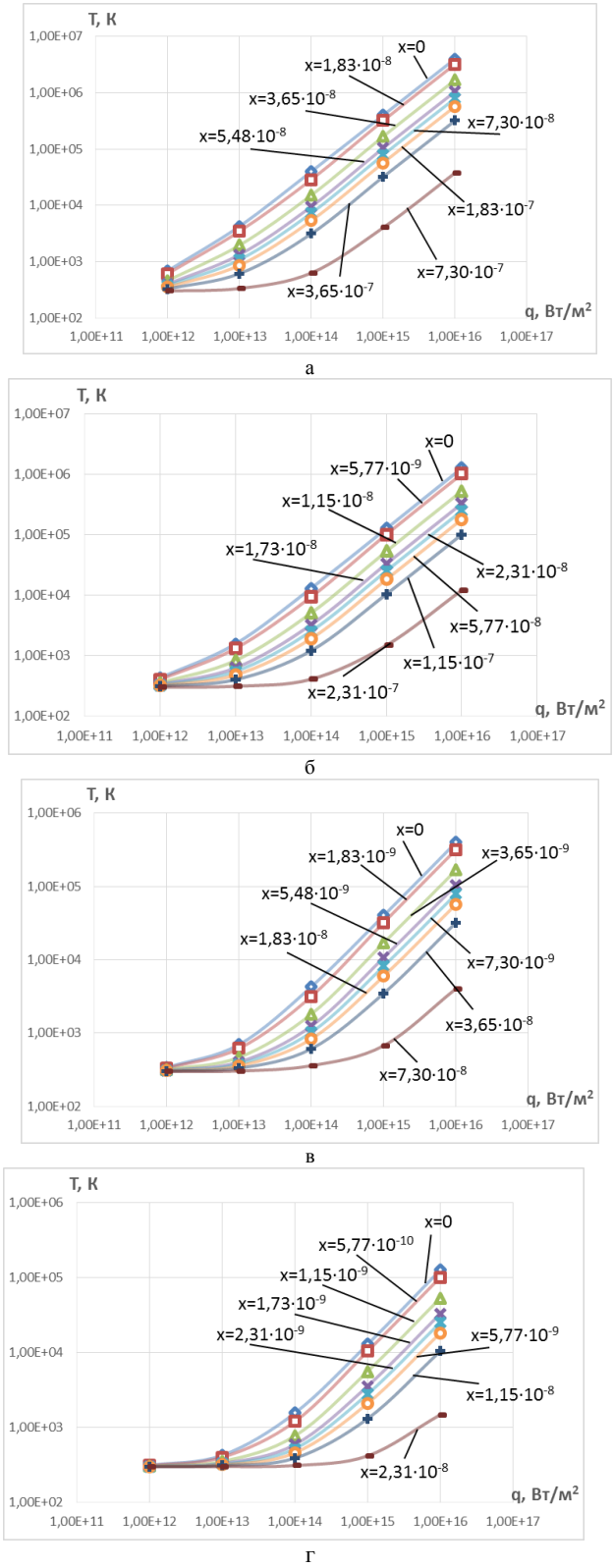
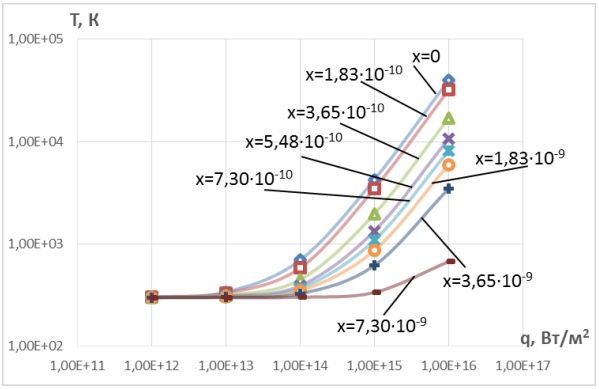
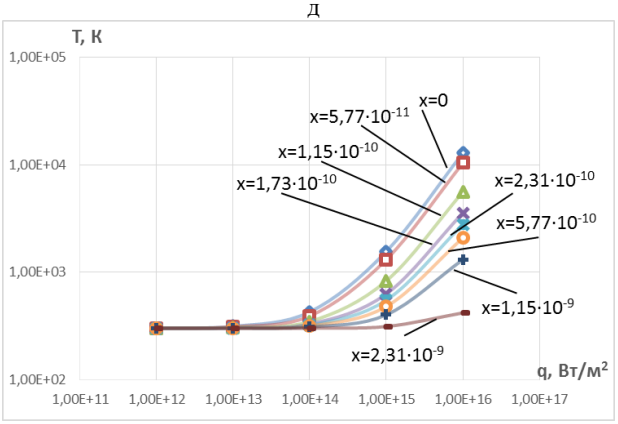


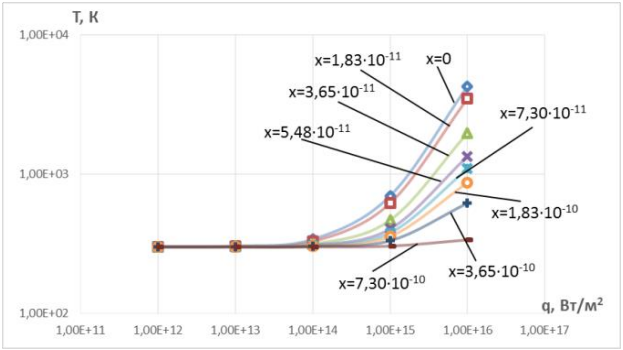
Рис. 2 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на СМЧ28.48 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10^{-16}$ с



д



е

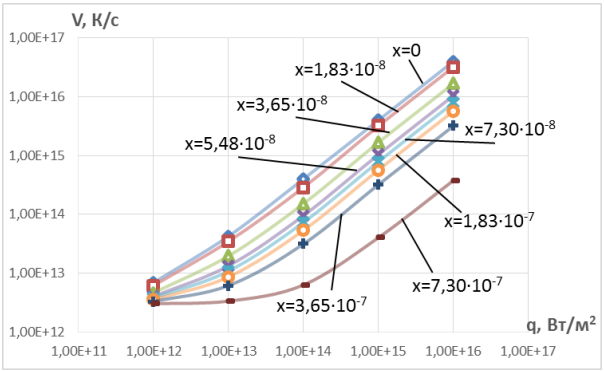


ж

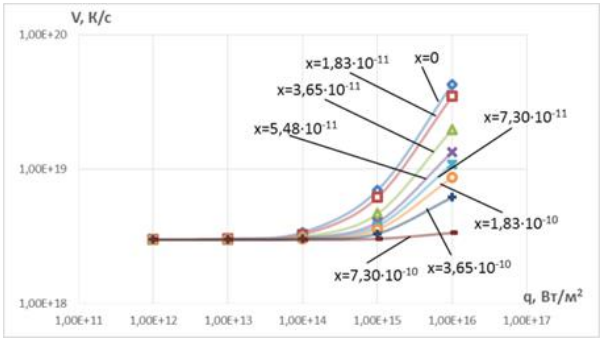
Рис.2 – Окончание

Скорость изменения максимальной температуры превышает 10^7 К/с, а значит по этому критерию всегда могут образовываться НС (рис.3).

Температурные напряжения определяют, как возможность ускорения образования НС (10^7 Па), так и позволяют непосредственно образовывать НС при превышении значений температурных напряжений 10^{10} Па.



а

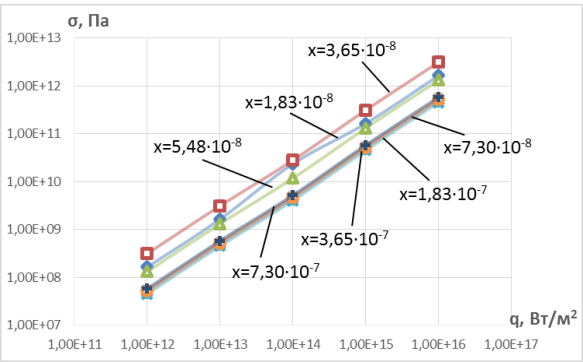


б

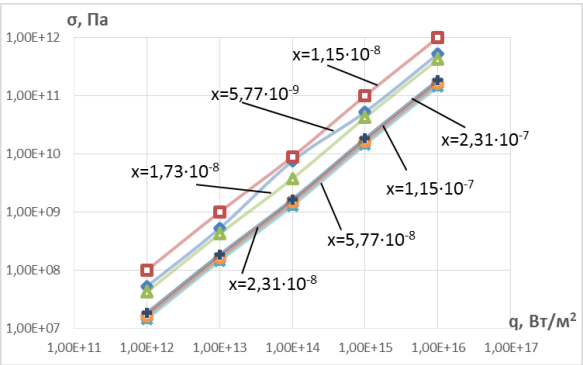
Рис.3 Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на СМЧ28.48 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10^{-16}$ с

Анализ зависимостей температурных напряжений от плотности теплового потока показывает, что существуют режимы при временах 10^{-10} с, 10^{-11} с и 10^{-12} с, при которых есть реальная возможность получения НС за счёт действия температурных напряжений, при дальнейшем уменьшении времён вероятность этого механизма образования НС снижается и реализуется только на ряде глубин порядка 10^{-9} м, а при временах 10^{-15} с и 10^{-16} с температурные напряжения могут только ускорить образование НС (рис.4).

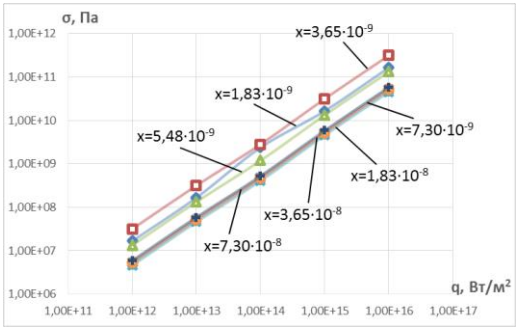
Технологу необходимо знать на каких глубинах есть вероятность образования НС, и какой объём зерна получится, поэтому были построены зависимости объёма зерна от максимальной и минимальной глубины залегания НК при действии ЛИ с различной плотностью теплового потока (q) для радиуса пятна контакта $R=10^{-6}$ м (рис.5) и $R=5\cdot10^{-7}$ м (рис.6).



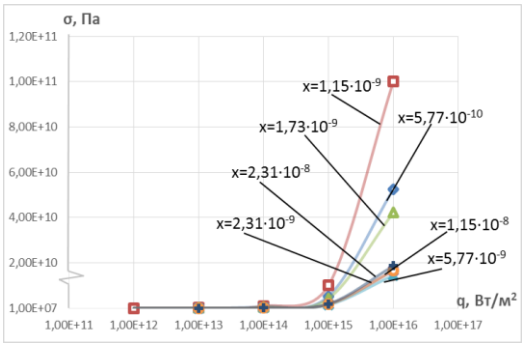
а



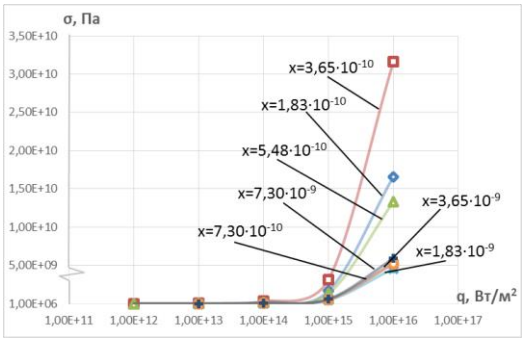
б



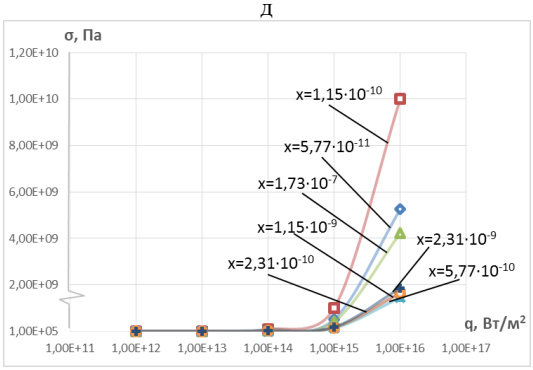
в



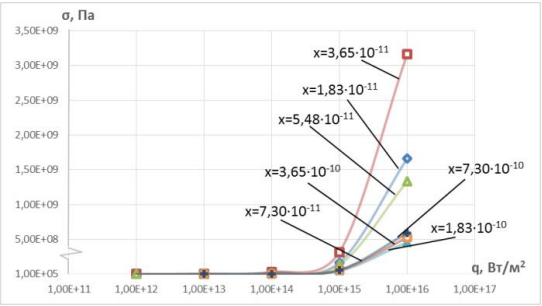
г



д



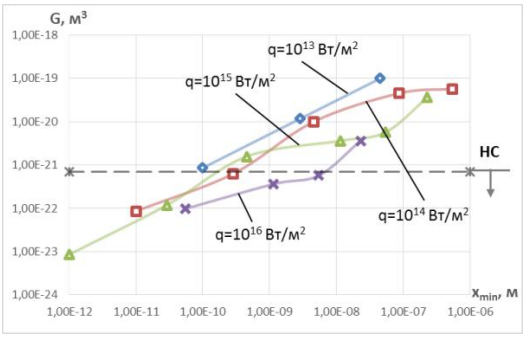
е



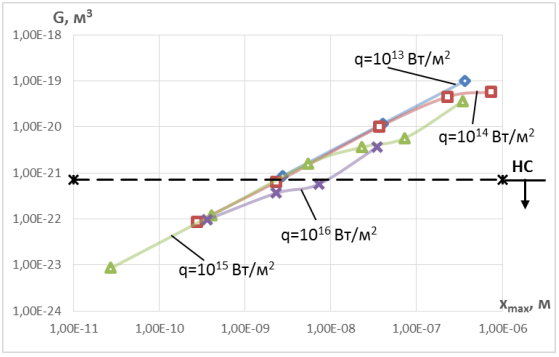
ж

Рис. 4 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на СМЧ28.48 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10^{-16}$ с

На этих рисунках пунктиром обозначена зона, ниже которой образуются НС, а выше – нет. Видно, что при радиусе пятна $R=5\cdot10^{-7}$ м технологических параметров, при которых объём зерна соответствует образованию НС гораздо больше, то есть надо стремится к гораздо меньшим размерам пятна контакта ЛИ с деталью.

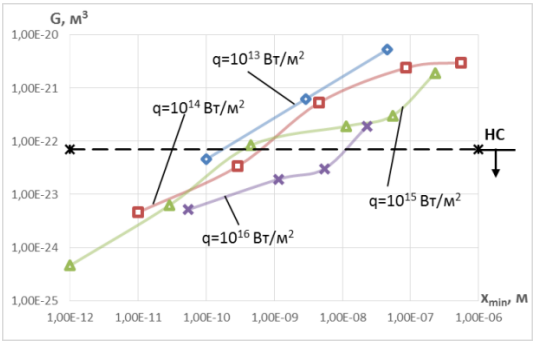


а

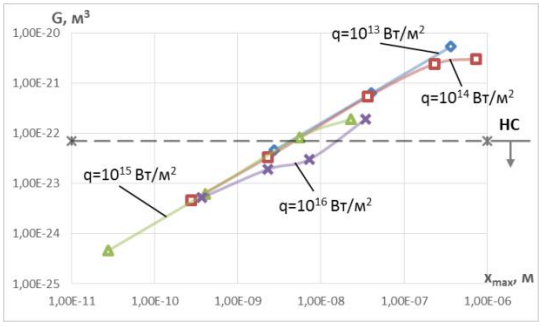


б

Рис. 5 – Зависимость объёма нанокластера $R=10^{-6}$ м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (СМЧ28.48)



а



б

Рис. 6 – Зависимость объёма нанокластера ($R=5\cdot10^{-7}$ м) от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (СМЧ28.48)

Проводились исследования как общего объёма зерна, по которому определялся размер зерна (предположение о сферической форме зерна) а также оценивалась толщина слоя, где развивается зерно.

В случае получения размера зерна по величине его объёма для радиуса пятна лазерного луча в 10^{-6} м реализуется только в режиме для получения наноструктур с плотностью теплового потока q= 10^{15} Вт/м^2 и времени его действия 10^{-16} с, тогда как при радиусе лазерного луча R=5·10^{-6} м режимы с образованием НС реализуются: 1.q= 10^{13} Вт/м^2, t= 10^{-12} с; 2. q= 10^{14} Вт/м^2 и t= 10^{-14} и 10^{-13} с; 3. q= 10^{15} Вт/м^2 и t= 10^{-16} и 10^{-15} с; 4. q= 10^{16} Вт/м^2 и t= 10^{-14}, 10^{-15}, 10^{-16} с.

Для экспресс-оценки необходимо иметь зависимости объёма нанокластера от плотности теплового потока ЛИ и времени его действия, что позволит быстро оценить технологические параметры получения НС. Так на рисунках 7 и 8 представлены зависимости объёма нанокластера от плотности теплового потока ЛИ и времени его действия для пятна контакта R=10^{-6} м (рис.7) и R=5·10^{-7} м (рис.8). Эти графики подтверждают тот тезис, что уменьшение размера зоны контакта ЛИ с деталью приводит к увеличению вероятности образования НС.

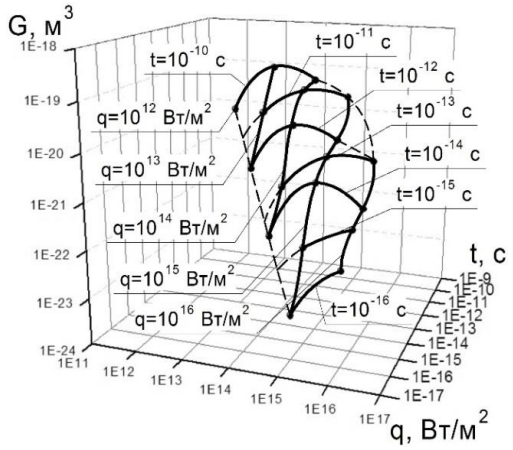


Рис. 7 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры (R=10^{-6} м) (СМЧ28.48)

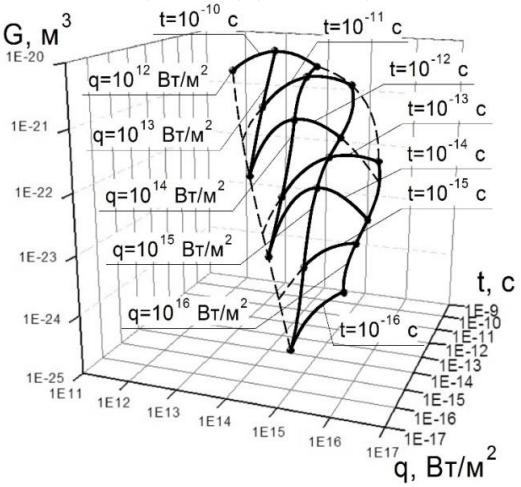


Рис. 8 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения – q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры (R=5·10^{-7} м) (СМЧ28.48)

Слои наноструктурной толщины реализуются практически при всех режимах. Это говорит о том, что кроме тех режимов, при которых гарантировано, получаются НС (по объёму зерна) есть вероятность в режимах близких к необходимым для получения НС по объёму зерна будет расширена область технологических параметров, при которых реализуются наноструктуры, поэтому при оценке технологических параметров образования НС будет учитывать и близкие к ним режимы.

Выводы.

1 Показана возможность с помощью фемтосекундного лазера получать НС на специальном чугуне (хромисто-кремниевом), как за счёт основных критериев получения НС (диапазон температур и превышения скорости роста температур 10^7 К/с), так и за счёт действия температурных напряжений.

2 Впервые показано, что есть реальная возможность получения наноструктурных слоёв на определённых глубинах, где зерно имеет вытянутую форму, но толщина его меньше предельной для наноструктуры (100 нм). 3 Показана возможность предварительной оценки технологических параметров ЛИ фемтосекундного лазера необходимых для получения НС.

Список литературы

1. *Костюк, Г. И* Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наносруктурными модифицированными слоями: Монография-справочник: в 2 кн./Г.И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2017. – Кн.2. Лазерные технологии. – 507 с.
2. *Костюк Г. И.* Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наносруктурными модифицированными слоями: Моногр.-справ.: в 2 кн. / *Г. И. Костюк* – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
3. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур [Текст]: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
4. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
5. *Костюк Г. И.* Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / *Г. И. Костюк*. – К.: Изд-во АИНУ, 2002.– Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий.–596 с.
6. *Костюк Г. И.* Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.
7. *Костюк*, Г. И. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. − Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
8. *Костюк, Г. И.* Научные основы создания современных технологий [Текст]: учеб.пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «*Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.*
9. *Костюк*, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем [Текст]: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
10. *Гусев, А. И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. *Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.*
11. *Андриевский*, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы [Текст] / Р. А. Андриевский// Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.

Bibliography (translitered)

1. *Kostyuk, G.I.* Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: sprav. G.I. Kostyuk. Kiev. Vid-vo «Planeta print», 2017. - 507 p.
2. *Kostyuk, G.I.* Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: sprav. G.I. Kostyuk. Kiev. Vid-vo «Planeta print», 2016. - 735 p.
3. *Kostyuk, G.I.* Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur [Tekst]: monogr. G.I. Kostyuk. Kiev. Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. - 472 p.
4. *Kostyuk, G.I.* Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy [Tekst]: monogr. G.I. Kostyuk.Kiev.: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. - 648 p.
5. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. 596 p.
6. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Reference for calculation of the main physical and technological parameters, assessing opportunities, selecting the type of technologies and equipment]. 482 p.
7. *Kostyuk, G.I.* Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' [Tekst]: ucheb.posobiye. G.I. Kostyuk. Kharkov. Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2009. 406 p.
8. *Kostyuk, G.I.* Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy [Tekst]: ucheb.posobiye G.I. Kostyuk. Kharkov. Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2008. - 552 p.
9. *Kostyuk, G.I.* Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem [Tekst]: monogr.-sprav. G.I. Kostyuk. Kharkov. Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t », 2007. - 633 p.
10. *Aksenov, I.I.* Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy [Tekst] / I.I. Aksenov. Kharkov: Izd-vo NII «KHFTI», 2005. 211 p.
11. *Gusev, A.I.* Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Tekst] / A.I. Gusev. - Moscow. Fizmatlit, 2005. 416 p.
11. *Andriyevskiy, R.A.* Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy [Tekst] R.A. Andriyevskiy. Fizika metallov i metallovedeniye. 2003. Vol. 91, No 1. pp.50 - 56.

Поступила (received) 15.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Перспективы получения наноструктур на специальном чугуне при действии фемтосекундного лазера / Г. І. Костюк, Є.А. Воляк, А.В. Євсеєнко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 75–80. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Перспективы получения наноструктур на специальном чугуне при действии фемтосекундного лазера / Г. И. Костюк, Е.А. Воляк, А.В. Евсеенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 75–80. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X**.**

Prospects for obtaining nanostructures on special cast iron under the action of a femtosecond laser / G.Kostiuk, E. Volyak, A. Eseenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.78–80. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович – доктор технічних наук, професор Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.Є. «ХАІ», тел .: (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Костюк Геннадий Игоревич – доктор технических наук, профессор Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Kostyuk Gennady Igorevich - Doctor of Technical Sciences, Professor of the National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel.: (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Воляк Олена Олександрівна - кандидат технічних наук Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.Є. «ХАІ», тел .: (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Воляк Елена Александровна – кандидат технических наук Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Volyak Elena Aleksandrovna **-** Candidate of Technical Sciences of the National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel .: (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Євсєєнкова Ганна Володимирівна - студентка кафедри теоретичної механіки, машинознавства і робото-механіческіх систем, Національного аерокосмічного університету ім. Жуковського М.Є. «ХАІ», тел .: (057) - 788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Евсеенкова Анна Владимировна – студентка кафедры теоретической механики, машиноведения и робото-механических систем, Национального аэрокосмического университета им. Жуковского Н.Е. «ХАИ», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

Yevseenkova Anna Vladimirovna - student of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robot Mechanics, National Aerospace University. Zhukovsky N.E. "KhAI", tel .: (057) -788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

.

УДК 621.879

О.В.ДЗЕРЖИНСЬКА, І.В. КРУПКО, О.В. КОТЛЯР

ВПЛИВ ФОРМИ ОПОРНОЇ ПОВЕРХНІ ЛИЖИ НА ПЕРЕМІЩЕННЯ КРОКУЮЧОГО ЕКСКАВАТОРА

В статті наведені витрати часу на переходи крокуючими екскаваторами, так як при пробуксовці лиж механізму пересування втрачається значна частина часу. Запропоновано конструкцію опорних елементів лижі крокуючого екскаватора. Обрані шляхи подальших досліджень з питання підвищення ефективності роботи механізму крокування шляхом збільшення лінії контакту опорних елементів лижи крокуючого екскаватора з ґрунтом, за рахунок збільшення площі деформації ґрунту опорних елементів лижи и сили опору ґрунту.

Ключові слова: драглайн, крокуючий механізм, опорні елементи, лижа, опорна поверхня, переміщення, ґрунт.

В статье приведены затраты времени на переходы шагающими экскаваторами, так как при пробуксовке лыж механизма передвижения теряется значительная часть времени. Предложена конструкция опорных элементов лыжи шагающего экскаватора. Избраны пути дальнейших исследований по вопросу повышения эффективности работы механизма шагания путем увеличения линии контакта опорных элементов лыжи шагающего экскаватора с грунтом, за счет увеличения площади деформации почвы опорных элементов лыжи и силы сопротивления почвы.

Ключевые слова: драглайн, шагающий механизм, опорные элементы, лыжа, опорная поверхность, перемещения, грунт.

In the article the time passes for transitions by stepping excavators are shown, as during skidding of skis of a movement mechanism a considerable part of time is lost. The design of the supporting elements of a walking stepper skis is proposed. Selected ways of further research on improving the efficiency of the stepping mechanism by increasing the contact line of the supporting elements of the track of the walking excavator with the soil, due to an increase in the area of deformation of the ground of the supporting elements of the ski and the strength of the ground resistance.

Keywords: dragline, walking mechanism, supporting elements, skis, bearing surface, movement, soil.

Постановка проблеми. Крокуючі екскаватори застосовуються для переекскавації ґрунту відвалів, виїмки розкривних порід середньої міцності, зачистки покрівлі видобувничого вступу та інших допоміжних робіт. Драглайни, як правило оснащені крокуючими механізмами, які мають різні конструкції. Суттєвим недоліком відомих крокуючих механізмів є буксовання опорних елементів лижи під час руху екскаватора. Таким чином, дослідження в даній області є актуальними і затребуваними.

Аналіз попередніх досліджень. Дослідження в області вивчення оптимальної форми опорної поверхні лижі були розглянуті багатьма ученими і інженерами [1] одними з основних напрямів розвитку питання про визначення оптимальної конструкції опорної поверхні лиж були Б.М. Кочергін, П.Ф. Нарижний, Ф.А. Вайцман [2] які виконали спрощення конструкції лижі внаслідок того, що додаткові опори виконані також у вигляді балок і закріплені на торцях основної балки, причому вісь шарнірного з'єднання балок збігається з подовжньою віссю основної балки. В.А. Маяковським, Д.К. Крюковим, О.О. Воробйовим, В.І. Соколовим і І.Б. Василенко [3] була розроблена конструкція лижі крокуючого екскаватора таким чином,до конструкції що існує були додані додаткові опорні елементи лижі, висота яких більше ніж висота основних опорних елементів. В.М. Волков, В.Є. Малигін, Ю.В. Харітонов і Б.С. Куперман [4] з метою підвищення проходження виконали лижу таким чином, що вона має порожнистий корпус, який містить верхній пояс, бокові стінки, сполучені з нижнім, гнучким поясом. Усередині кожної стінки розташовані, у свою чергу обмежувальні ребра. Усередині порожнистого корпусу розташовані порожнисті кулі. Які вільно перекочуються усередині порожнистого корпусу. Про те оптимальна конструкція опорної поверхні лижі крокуючого екскаватора не до кінця встановлена. Тому нині йде робота по розробці оптимальної конструкції опорної поверхні лиж драглайну.

Мета роботи – підвищення ефективності роботи механізму крокування шляхом збільшення лінії контакту опорних елементів лижи крокуючого екскаватора з ґрунтом, за рахунок збільшення площі деформації ґрунту опорних елементів лижи и сили опору ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Досвід експлуатації крокуючих екскаваторів з опорними елементами лижі, який являє собою прямокутні куточки, розміщені на рівному відстані по всій поверхні лижі, показує, що конструювання опорних поверхонь лиж крокуючих екскаваторів має йти шляхом вдосконалення конструкції опорної поверхні лиж драглайнів і збільшення швидкості їх пересування.

Низька в порівнянні з іншими типами ходового обладнання швидкості пересування машин на крокуючому ходу і їх пробуксовування при пересуванні призводять до винекнення додаткових навантажень та збільшення часу на переходи і зменшення часу, який використовується на екскавацію ґрунту. Це значно впливає на економічну ефективність застосування крокуючого екскаватора.

Час витрачений на переходи крокуючим екскаваторами протягом року, складає до 17% часу на екскавацію ґрунту [5] . Ці показники враховують витрати часу на технологічні та транспортні переміщення машин. Спостереження, проведені протягом року на кар'єрах вогнеупорних глин і каолінів (кар'єри Дружковського рудоуправління, Іршанського ГЗК та інші), показують, що технологічне пересування екскаваторів з ківшом місткістю 5-15 м^3 і стрілою 45-90 м займає до 80 хвилин в зміну і складає до 26% витрат часу на екскавацію.

При тому експлуатаційна продуктивність залежить від можливості крокуючого екскаватора самостійно рухатися по ґрунтовому поверхням кар'єрів.

© О.В.Дзержинська, І.В. Крупко, О.В. Котляр, 2017

Експлуатаційна продуктивність екскаватора при нетранспортній системі розробки може бути визначена за формулою [1]:

$$Q_е = Q_т \cdot К_у \cdot К_п \cdot К_{вз}, \quad (1)$$

де $Q_е$ - експлуатаційна продуктивність екскаватора;

$Q_т$ - технічна продуктивність екскаватора;

$К_у$ - коефіцієнт управління, показує вміння і здатність машиніста працювати на важелях управління та якості системи управління;

$К_{вз}$ - коефіцієнт використання зміни;

$К_п$ - коефіцієнт впливу пересування.

Величина коефіцієнту впливу пересування залежить від конструкції опорної поверхні лиж. Яка може бути наступних видів:

- з гладкою поверхнею;
- з опорною поверхнею яка в поздовжньому перетині з боку спирання на ґрунт обмежена ламаною лінією;
- з висотою кожного попереднього опорного елемента в напрямку ковзання лижі менше висоти кожного наступного опорного елемента;
- з додатковими опорами, які виконані у вигляд балок і закріплені на торцях основної балки, причому вісь шарнірного з'єднання балок збігається з поздовжньою віссю основної балки;
- з закріпленими всередині кожної стінки паралельно розташованими обмежувальними ребрами, між якими розташований з можливістю переміщення у вертикальній площині верхній пояс, при цьому лижа має розташування всередині порожнього корпусу пружні елементи кулястої форми.

Додаткові елементи опорної поверхні забезпечують відсутність пробуксовування лиж відносно опорної поверхні ґрунту вибою.

Якщо позначити чисту тривалість розробки елемента забою через $t_{ел}$, тривалість пересування без урахування пробуксовування через $t_п$, то коефіцієнт впливу пересування буде дорівнювати:

$$K_n = \frac{t_{ел}}{(t_{ел} + t_n)}, \quad (2)$$

$$t_{ел} = \frac{60 \cdot P \cdot B \cdot L_n}{Q_т \cdot К_у)}, \quad (3)$$

де B - ширина забою, м;

P - потужність відпрацьованого розкрива, м;

L_n - довжина пересування екскаватора, м.

Швидкість руху екскаватора без урахування пробуксовування

$$V_п = L_к \frac{60}{t_к}, \quad (4)$$

де $L_к$ -довжина кроку, залежна від конструктивних параметрів крокуючого механізму, м.;

$t_к$ - середня тривалість циклу крокування, хвл.

Швидкість руху екскаватора з урахуванням ковзання $\sum \Delta l_i$ лиж відносно ґрунтової поверхні кар'єра визначається за формулою [5]:

$$V'_п = (l_к - \sum \Delta l_i) \frac{60}{t_к}, \quad (5)$$

де коефіцієнт впливу пересування з урахуванням пробуксовування[6]:

$$\frac{t_{ел}}{(t_{ел} + t_n)} = K_n, \quad (6)$$

$$t'_п = \frac{l_к}{V_п\,(1 - \delta_б)}. \quad (7)$$

Якщо позначити через $\delta_б$ коефіцієнт буксування, рівний відношенню $\frac{\sum \Delta l_i}{L_к}$ сумарного за цикл крокування прослизання лиж по ґрунтовій поверхні кар'єру до довжини кроку $L_к$ драглайну, то залежність (5) можна представити у вигляді:

$$V'_п = V_п (1 - \delta_б), \quad (8)$$

Сумарне за цикл крокування прослизання лиж по ґрунтовій поверхні кар'єра $\sum \Delta l_i$ знаходяться за графіками (рис.1) в залежності від величини $\sum \Delta \theta_i$ сумарного за цикл крокування кута повороту кривошипа механізму, відповідного буксування.

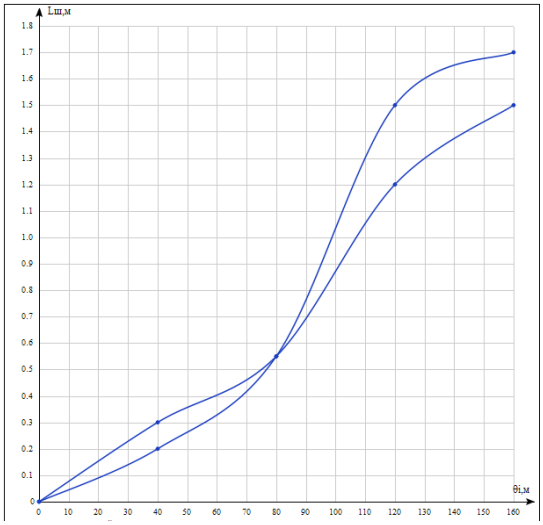


Рис.1. – Залежність довжини кроку від кута повороту кривошипа:
а – для ЕШ 10.70; б – для ЕШ 15.90

Звідси експлуатаційна продуктивність екскаватора з урахуванням часткового пробуксовування при пересуванні може бути визначена за формулою[9]:

$$\theta_е = \theta_т \cdot К_у \cdot К'_п \cdot К_{ис}, \quad (9)$$

Нестранспортні системи розробки характеризуються жорстким взаємозв'язком між розкривними і добувними роботами. При цьому природно виникає

необхідність у кількісній ув'язці швидкостей руху розкривних і видобувних машин. Вплив коефіцієнта буксування на швидкість руху машини відображено в залежності (8).

При організації робіт, що передбачає холостий хід драглайна, збільшення часу холостого ходу внаслідок часткового пробуксовування визначається наступною формулою [10]

$$\Delta T = \frac{L_ф \cdot \delta_б}{V_п\,(1-\delta_б)}. \qquad (10)$$

де $L_ф$ – протяжність фронту робіт.

При числі відпрацьовуються протягом року заходок n, втрати часу внаслідок часткового пробуксовування складуть $n\Delta T$.

У сучасному екскаваторобудуванні найчастіше випускають крокуючи екскаватори з лижами, які включають порожнистий корпус, який містить верхній пояс і бічні стінки, з'єднані з нижнім поясом, який виконаний гнучким, у вигляді суцільної еластичної оболонки. Внутрішній об'єм кожної лижі заповнений пружними елементами, наприклад у вигляді порожніх куль. Під час сходження, коли лижа спирається на ґрунт, гнучкий нижній пояс деформується, копіюючи рельєф місцевості, при цьому кулі вільно перекочуються усередині полого корпусу, утворюючи горизонтальний верхній шар, на який і спирається верхній пояс. Таке виконання лиж крокуючого механізму забезпечило щільне притиснення їх до ґрунту і зменшило можливо прослизання лиж під час сходження і підвищило проходження драглайна.

Головним недоліком відомої лижі крокуючого механізму є висока вартість виготовлення і ремонту гнучкого нижнього поясу, крім того існує небезпека пошкодження гнучкого нижнього поясу при випадковому його наїзді на гострі предмети. В основу проектування нової конструкції опорних елементів лижі драглайна поставлена задача підвищити ефективність роботи механізму крокування шляхом збільшення лінії контакту опорного елементу з ґрунтом за рахунок збільшенні площі деформації ґрунту опорних елементів і сили опору ґрунту.

Запропонована конструкція опорного елемента лижі, являє собою, рівномірно розташовані опорні елементи на нижній опорній поверхні лижі крокуючого механізму, кожен опорний елемент виконаний у вигляді ламаної лінії, що нагадує за своєю будовою «шеврон»; при цьому вершини кутів опорних елементів спрямовані в бік руху і розташовані на поздовжній осі лижі, крім того на похилій опорній поверхні лижі встановлені як мінімум два опорних елемента.

Завдяки тому, що в лижі крокуючого механізму кожен опорний елемент виконаний у вигляді ламаної лінії і при цьому вершини кутів опорних елементів спрямовані в бік руху і розташовані на поздовжньої осі лижі, забезпечено збільшення лінії контакту кожного опорного елементу з ґрунтом і площі деформації ґрунту опорного елементу і сили опору зсуву ґрунту, підвищена ефективність роботи крокуючого механізму.

Завдяки тому, що в лижі крокуючого механізму кожен опорний елемент виконаний у вигляді ламаної лінії і при цьому вершини кутів опорних елементів спрямовані в бік руху і розташовані на поздовжньої осі лижі, забезпечено збільшення лінії контакту кожного опорного елементу з ґрунтом і площі деформації ґрунту опорного елементу і сили опору зсуву ґрунту, підвищена ефективність роботи крокуючого механізму.

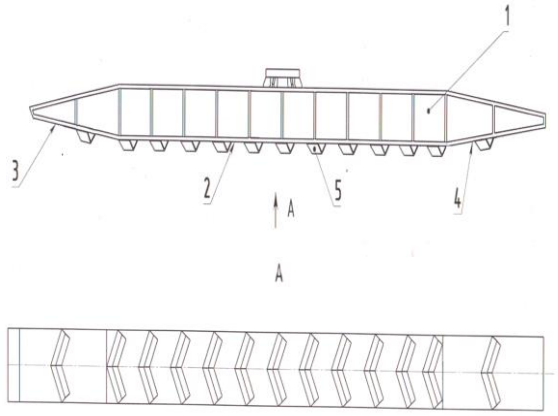


Рис. 2 – Вдосконалена конструкція опорної поверхні лиж крокуючого екскаватора: 1-корпус; 2- горизонтальна поверхня; 3,4 - похила поверхня; 5- опорний елемент лижи.

Лижа крокуючого механізму (рис. 2) складається з корпусу 1, виконаного у вигляді зварної з листового вальцювання балки. Опорна поверхня лижі складається з горизонтальної поверхні 2 і двох похилих поверхонь 3 і 4. На горизонтальній опорній поверхні 2 рівномірно розташовані опорні елементи лижи крокуючого екскаватора 5.

Опорні елементи лижи 5 закріплені симетрично до поздовжньої осі лижі, а вершина кожного опорного елементу спрямована в бік руху машини.

Таке розташування опорних елементів лижи 5 крокуючого екскаватора забезпечило збільшення лінії контакту кожного опорного елемента з ґрунтом і зменшило величину деформації ґрунту опорного елементу під час сходження, 1 як наслідок - збільшило тангенціальні сили опору, що діють на опорні елементи лиж. Таким чином усунуті можливо ковзання лижі по ґрунту під час сходження і підвищена ефективність роботи крокуючого механізму.

Робота запропонованої конструкції опорних елементів лиж механізму крокування, відбувається таким чином, наприклад, під час сходження драглайна, лижі крокуючого механізму розташовані симетрично до поздовжньої осі машини, здійснюють плоскопаралельне переміщення в бік руху машини і опускаються на ґрунт. Далі, розглянемо роботу крокуючого механізму під час руху по різному типу ґрунту: щільному (рис. 3) і пухкому («слабкому»).

У разі руху машини по щільному ґрунту, під дією зусиль, що передаються двигуном крокуючого механізму, відбувається притискання опорної поверхні 2 кожної лижі в ґрунт і занурення в ґрунт опорних елементів лижі 5 крокуючого екскаватора. За рахунок виконання опорних елементів 5 у вигляді ламаної лінії, а саме у вигляді «шеврони », і напрямок вершин кутів кожного опорного елементу лижі в сторону руху

машини, збільшена загальна довжина лінії контакту опорних елементів з ґрунтом, і як наслідок, збільшено площу ґрунту, що мнеться опорними елементами лижі крокуючого екскаватора.

Внаслідок збільшення площі м'ятою опорними елементами лижі ґрунтом збільшуються тангенціальні сили опору. Це забезпечило надійне утримання кожної лижі нерухомою щодо ґрунту, усунуло її ковзання і збільшило ефективність роботи крокуючого механізму драглайна.

За рахунок того, що опорні елементи лижі 5 крокуючого екскаватора встановлені симетрично до поздовжньої осі лижі, усунуті виникнення додаткових бічних зусиль, що діють на лижу і елементи крокуючого механізму.

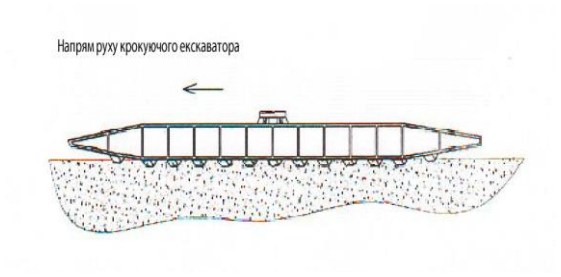


Рис. 3 – Робота крокуючого механізму під час руху по щільному ґрунту

У разі якщо машина крокує по пухкому ґрунту або «слабкому» (рис. 4) ґрунті під дією зусиль від крокуючого механізму, як і в першому випадку, відбувається притискання опорної поверхні 2 кожної лижі до поверхні ґрунту.

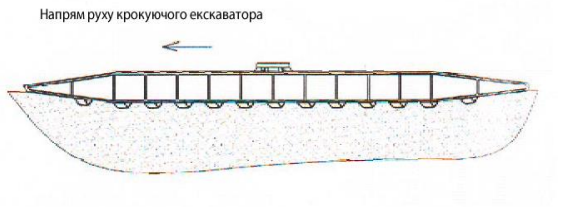


Рис. 4 – Робота крокуючого механізму під час руху по пухкому ґрунту

При цьому відбувається ущільнення пухкого шару ґрунту і занурення лиж на певну глибину. В наслідок цього, під час сходження в роботу вступають не тільки опорна поверхня 2, але і похилі поверхні 3 і 4. У той же час з ущільненням ґрунту відбувається також занурення в ґрунт опорних елементів лижі 5 крокуючого екскаватора, розташованих на вищезазначених поверхнях. Наслідком цього є утворення тангенціальних сил опору, що діють на кожен опорний елемент лижі крокуючого екскаватора.

Таким чином, під час того, що крокує по пухкому або «слабкого» ґрунту, у створенні сил опору ковзанню лиж щодо ґрунту беруть участь всі опорні поверхні 2, 3 і 4 і всі опорні елементи 5 кожної лижі. Це підвищує ефективність роботи крокуючого механізму і ефективність переміщення драглайна по пухким і «слабким» ґрунтам.

Висновки. Виявлені наступні залежності, що чим довше буде фронт робіт, тим більше будуть, тобто чим частіше змінюється напрямок ходу екскаватора, і чим більше коефіцієнт буксування. Дослідження експлуатації крокуючих екскаваторів з опорними елементами лижі, який являє собою прямокутні куточки, розміщені на рівному відстані по всій поверхні лижі, показує, що конструювання опорних поверхонь лиж крокуючих екскаваторів має йти по шляху вдосконалення конструкції опорної поверхні лиж драглайнів і збільшення швидкості їх пересування. Приведена нова конструкція опорних елементів лижі, яка дозволить покращити зчеплення крокуючого екскаватора з ґрунтом, збільшити зону зчеплення, зменшити пробуксовування, і в значній мірі зменшити час простою.

Список літератури:

1. *Подерни Р.Ю.* Механическое оборудование карьеров / Р.Ю. Подерни // – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – 680 с.
2. *Хмызников К.П.* Механическое оборудование карьеров. Одноковшовые экскаваторы / К.П. Хмызников // –М.: СПГГИ, 2007. - 41 с.
3. *Ефременков А.Б.* Горные машины и оборудование / А.Б. Ефременков // – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 152 с.
4. *Будішевський В.О.* Проектування транспортних систем енергоємних виробництв / В.О. Будішевський // –Донецьк, 2008.– 439 с.
5. Лукьянов В.Г. Горные машины и проведение горно-разведочных выработок/ В.Г. Лукьянов//– Томск: Изд. ТПУ, 2010. - 342с.
6. *Дзержинська О.В.* Дослідження техніко-економічного питання використання крокуючого кривошипно-важильного механізму на драглайні / О.В.Дзержинська // Сучасні аспекти механізації та автоматизації енергоємних виробництв: всеукраїн. научн.-прак. конф., 11-12 квітня 2017 р.: збірник наукових праць - Покровськ: ДВНЗ “ДНТУ”, 2017. − С. 32-37.

References (transliterated)

1. *Poderni R.Ju.* Mehanicheskoe oborudovanie kar'erov [Mechanical equipment of quarries]. Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstven-nogo gornogo universiteta, 2007. 680 p.
2. *Khmyznikov K.P.* Mekhanicheskoye oborudovaniye kar'yerov. Odnokovshovyye ekskavatory [Mechanical equipment of quarries. Single-bucket excavators]. Moscow, SPGGI, 2007. 41 p.
3. *Yefremenkov A.B.* Gornyye mashiny i oborudovaniye [Mining machines and equipment]. Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2009. 152 p.
4. *Budishevsky V.O.* Proyektuvannya transportnikh sistem yenergoêmnikh virobnitstv [Design of transport systems of energy vinibnitsov]. Donetsk, 2008.439 p.
5. *Lukyanov V.G.* Gornyye mashiny i provedeniye gorno-razvedochnykh vyrabotok [Mining machines and carrying out of prospecting workings]. Tomsk, Ed. TPU, 2010. 342p.
6. *Dzerzhinskaya O.V.* Doslidzhennja tehniko-ekonomichnogo pitannja vikoristannja krokujuchogo krivoshipno-vazhil'nogo mehanizmu na draglajni [Investigation of the technical and economic issue of using a stepping crank-weighting mechanism on draglines]. Suchasni aspekti mehanizacії ta avtomatizacії energoємnih virobnictv: vse-ukraïn. nauchn.-prak. konf., 11-12 kvitnja 2017 r.: [Modern aspects of mechanization and automation of energy-intensive industries: all-Ukrainian. Scientific works Conf., April 11-12, 2017: Collection of Scientific Papers]. Pokrovsk: DNEZ "DNTU" Publ., 2017, pp.. 32-37.

Поступила (received) 17.03.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив форми опорної поверхні лижи на переміщення крокуючого екскаватора / О.В. Дзержинська, І.В. Крупко, О.В. Котляр // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 81–85. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Влияние формы опорной поверхности лыжи на перемещение шагающего экскаватора / О.В. Дзержинская, И.В. Крупко, А.В. Котляр // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 81–85. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Influence of the shape of the reference surface of the ski on the movement of a walking excavator / O. Dzerzhinskaya, I. Krupko, A. Kotlyar // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.81–85. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дзержинська Ольга Віталіївна – аспірант кафедри «Підйомно-транспортні машини» Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ; тел.: +380994479903; e-mail: olgadzerzhins@gmail.com;

Дзержинская Ольга Витальевна – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные машины»Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск; тел.: +380994479903; e-mail: olgadzerzhins@gmail.com;

Dzerzhinskaya Olga Vitalievna– postgraduate student of the chair "Lifting-transport vehicles" of the Donbas State Machine-Building Academy, Kramatorsk; tel.: +380994479903; e-mail: olgadzerzhins@gmail.com;

Крупко Ігор Валерійович **–** кандидат технічних наук, доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини» Донбаської державні машинобудівної академії, Краматорськ; тел.: +38-0509142508; e-mail: ptm@dgma.donetsk.ua;

Крупко Игорь Валерьевич **–** кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины»Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск; тел.: +38-0509142508; e-mail: ptm@dgma.donetsk.ua;

Krupko Igor Valerevich **-** Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the chair "Lifting-transport vehicles" of the Donbass State Machine-Building Academy, Kramatorsk; tel .: +38-0509142508; e-mail: ptm@dgma.donetsk.ua;

Котляр Олексій Віталійович – канд. технічних наук, доцент кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», Харків; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

Котляр Алексей Витальевич – канд. технических наук, доцент кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехничемктй университет», Харьков; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

Kotlyar Alexey Vitalyevich **-** Candidate of Technical Sciences, Docent of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25; e-mail: evgeniya.ivaschenko@mail.ru.

.

УДК 621.717

Л. Я. РОП'ЯК

СКЛАДАЛЬНІ НАПРУЖЕННЯ В РОБОЧОМУ КОЛЕСІ ВІДЦЕНТРОВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Проаналізовано умови роботи відцентрових вентиляторів, причини виходу з ладу їх робочих коліс і встановлено, що найбільш небезпечним є втомне руйнування заднього диска та конічної кришки у місці їх з'єднання зі ступицею за допомогою болтів із гайками. Зроблено огляд методів складання напружених конструкцій в машинобудуванні. Сформульовано та розв'язано задачу про складальні напруження в системі «задній диск (кільцева пластина) – ступиця – конічна кришка (конічна оболонка)», які спричинені похибкою формоутворення конічної поверхні оболонки. Встановлено, що найбільші еквівалентні напруження, обчислені з використанням енергетичної теорії міцності, досягаються на внутрішній межі спряження заднього диска зі сходинкою ступиці. Запропоновано методику розрахунку величини взаємного переміщення (попереднього зазору) при складанні заднього диска, ступиці та конічної кришки, яке забезпечує заданий коефіцієнт запасу міцності робочого колеса.

Ключові слова: складання, зазор, робоче колесо, відцентровий вентилятор, кільцева пластина, конічна оболонка, складальні напруження, еквівалентні напруження, коефіцієнт запасу міцності.

Проведен анализ условий работы центробежных вентиляторов, причин выхода из строя их рабочих колес и установлено, что наиболее опасным является усталостное разрушение заднего диска и конической крышки в месте их соединения со ступицей при помощи болтов с гайками. Сделан обзор методов сборки напряженных конструкций в машиностроении. Сформулирована и решена задача о сборочных напряжениях в системе «задний диск (кольцевая пластина) – ступица – коническая крышка (коническая оболочка)», вызванных погрешностью формообразования конической поверхности оболочки. Установлено, что наибольшие эквивалентные напряжения, расчитанные с использованием энергетической теории прочности, достигаются на внутренней границе сопряжения заднего диска со ступенькой ступицы. Предложена методика расчета величины взаимного перемещения (предварительного зазора) при сборке заднего диска, ступицы и конической крышки, при котором будет обеспечен заданный коэффициент запаса прочности рабочего колеса.

Ключевые слова: сборка, зазор, рабочее колесо, центробежный вентилятор, кольцевая пластина, коническая оболочка, сборочные напряжения, эквивалентные напряжения, коэффициент запаса прочности.

The operation conditions of centrifugal fans and the reasons of the impellers' failures were analyzed and found that the most dangerous is fatigue failure of the hub plate and a conical lid in place of their connection to the hub with bolts and washers. The review of methods for composing the stressed structures in the mechanical engineering was done. We've formulated and solved the problem about assembly stresses in the "hub plate (circular plate) – hob – conical cap (conical shell)" system that were caused by the error of forming of a conical surface shell. To describe an axially symmetrical design of the composed structure we used an equation from the classical theory of conical shells and circular plates. Fitting conditions of the shell and the plate take into account the presence of the technological joint gap (tension). Based on the analytical solution of the problem it was revealed that the biggest equivalent stresses, calculated using the maximum-strain-energy of failure theory, can be achieved on the inner boundary of fitting hub plate and hob step. We suggest the methodology of calculating the amount of relative motion (previous gap) when composing the hub plate, hob and conical shell that provides a specified safety factor of the impeller.

Keywords: fitting, gap clearance, impeller, centrifugal fan, hub plate, conical shell assembly stresses, equivalent stresses, safety factor.

Вступ. Вентилятори застосовують у різних галузях промисловості та в побуті для вентиляції, провітрювання, кондиціювання повітря та повітряного опалення тощо [1], забезпечуючи при цьому належні санітарні умови праці робітників та тривалу безаварійну експлуатацію обладнання. Більшість вентиляторних установок експлуатуються в режимі всмоктування, тобто транспортують не звичайне атмосферне повітря, а повітряну суміш, яка містить у своєму складі рудникові гази чи технологічні викиди, пари, порох та інші абразивні частинки. Вентилятори працюють у постійному режимі або в режимі періодичного включення. В зв'язку з цим до вентиляторних установок висувають підвищені вимоги щодо надійності роботи, а також щодо стійкості до корозії, зношування і втоми деталей робочого колеса та корпусу вентилятора, оскільки їх вихід з ладу може призвести до виникнення аварійних ситуацій. Особливо актуальними ці питання є для газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. За будовою і принципом роботи вентилятори поділяють на осьові (аксіальні) та відцентрові (радіальні) [1, 2]. Основним вузлом вентилятора є його робоче колесо. Робоче колесо осьового вентилятора містить: ступицю, задній диск, лопаті та передній диск, а відцентрового вентилятора – ступицю, задній диск (кільцеву пластину), лопаті, передній диск (кільце) та конічну кришку (конічну оболонку). В осьовому вентиляторі зазвичай повітря проходить вздовж осі обертання робочого колеса, встановленого в циліндричному корпусі. У відцентровому вентиляторі повітря входить у робоче колесо в осьовому напрямку, відхиляється в ньому на кут 90° у радіальному напрямку, і за рахунок дії відцентрових сил виходить через отвір у спіральному (равликоподібному) корпусі. Залежно від типу та конструкції вентилятора робоче колесо встановлюють на валу електродвигуна або на окремому валу.

Найменшою міцністю та жорсткістю володіють барабанні колеса відцентрових вентиляторів, які працюють у найбільш важких умовах. Вони піддаються циклічним навантаженням, які підсилюються при виникненні дисбалансу в процесі експлуатації вентилятора. Для підвищення експлуатаційних характеристик робочого колеса, виготовленого із алюмінієвого деформованого сплаву в іскробезпечному виконанні, задній диск додатково споряджають конічною кришкою (конічною оболонкою), яку по внутрішньому краю з'єднують із ступицею за допомогою болтів із гайками, а по зовнішньому краю – приклепують до периферійної частини цього диска. Обстеження зруйнованих робочих коліс відцентрових вентиляторів показали, що найбільш небезпечним є втомне руйнування заднього диска і конічної кришки у місці їх спряження зі сходинкою ступиці за допомогою бол-

© Л.Я. Роп'як, 2017

тового з'єднання із гайками. В окремих випадках спостерігалось також і втомне руйнування ступиці, виготовленої із ливарного алюмінієвого сплаву.

В процесі виготовлення конічної оболонки обробкою тиском складно забезпечити отримання номінального значення кута при її вершині. Це обумовлено нестабільністю фізико-механічних властивостей алюмінієвих сплавів і товщини листів при переході від однієї партії до іншої партії металу від різних виробників прокату. Збирання неточно виготовлених деталей спричиняє появу складальних напружень, які разом із напруженнями від експлуатаційних навантажень можуть призвести до виникнення критичного напружено-деформованого стану в деталях робочого колеса відцентрового вентилятора. Тому можливість виникнення складальних напружень, керування їх рівнем та знаком слід обов'язково враховувати як на стадії розроблення технологічних процесів виготовлення деталей, так під час складання вузлів.

В машинобудуванні широко розповсюджені напружені конструкції [3]. Для забезпечення нерухомого з'єднання двох деталей по коловій циліндричній поверхні застосовують посадки з натягом, так звані пресові з'єднання (встановлення дисків і зубчастих коліс на валах, зубців у корпусі шарошки тощо). Складання цих з'єднань виконують різними способами: пресуванням, нагріванням втулки, охолодженням вала. Розрахунок міцності та деформацій деталей пресового з'єднання проводять за формулами для товстостінних циліндрів [4, 5]. З'єднання бувають дво- [4, 5] або трикомпонентні [6]. Автор [7] дослідив вплив похибок геометрії форми деталей на міцність з'єднання «вал – втулка» з натягом. Для підвищення якості з'єднань великогабаритних складених виробів запропонована технологія нанесення комбінованого покриття з чергуванням кілець різної твердості на поверхні вала, який спрягається із втулкою [8].

Для осьової фіксації деталей машин широко застосовують стопорні кільця, які встановлюють із натягом у кільцевій проточці, виконаній на валу або в отворі втулки (корпусу) [4]. Напружені конструкції також застосовують і в поршневих двигунах внутрішнього згорання, поршневих компресорах і насосах для герметизації рухомих з'єднань «циліндр – поршень». Для цього на зовнішній циліндричній поверхні поршня виконують ряд кільцевих канавок, в які встановлюють розрізні пружні поршневі металеві кільця. Оскільки ці кільця в ненапруженому стані мають зовнішній діаметр дещо більший від внутрішнього діаметра циліндра, тому під час складання їх попередньо стискають за допомогою спеціального пристрою для забезпечення входження вузла поршня в циліндр [3]. Методика розрахунку поршневих кілець наведена в монографії [9].

Окремі дослідження присвячені покращенню технологічних процесів складання. Так у роботі [10] запропоновано новий спосіб алгоритмічного формування сукупності схем складання, який дозволяє врахувати вид зв'язків між деталями та раціонально завантажувати обладнання.

У праці [11] вивчена міцність і вібрації лопатей та дисків парових турбін. Автор [12] дослідив методом скінчених елементів напружено-деформований стан лопатей робочого колеса осьового вентилятора установки головного провітрювання шахти. Аналітичному розрахунку клемового з'єднання хвостовика лопаті із дисками та ступицею залежно від виду спряження та кута обхоплення деталей робочого колеса осьового вентилятора наддуву газоперекачуючого агрегату ГТК-25И присвячена робота [13].

Проведений аналіз нормативної, науково-технічної, патентної та довідкової літератури показав, що дослідники зосереджуються в основному на вивченні з'єднання «вал – втулка», вдосконаленні технології виготовлення деталей і складання вузлів, але практично відсутні відомості про вибір кутових параметрів конічної кришки (конічної оболонки) при складанні робочих коліс відцентрових вентиляторів та їх напружено-деформований стан (складальні напруження). Це стримує раціональний вибір зазорів (натягів) у системі «задній диск (кільцева пластина) – ступиця – конічна кришка (конічна оболонка)» для забезпечення підвищення ресурсу їх роботи.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в розробленні методики розрахунку складальних напружень у робочому колесі відцентрового вентилятора, які зумовлені похибками формоутворення конічної поверхні оболонки, та в обґрунтуванні допустимих зазорів (натягів) задля досягнення прийнятного запасу міцності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

– розробити математичну модель складеного вузла «задній диск – ступиця – конічна кришка» з кутом при вершині конуса оболонки, що різниться від номінального;

– визначити еквівалентні складальні напруження в деталях робочого колеса, що залежать від величини зазору (натягу);

– встановити допустимі значення зазорів, за яких забезпечується потрібний запас міцності конструкції.

Матеріали, технологія виготовлення деталей та складання робочого колеса відцентрового вентилятора. Для виготовлення деталей робочого колеса відцентрового вентилятора (рис. 1) використали алюмінієвий деформований сплав Д16Т з хімічним складом за ГОСТ 4784-74. Механічні властивості: межа міцності – 392–421 МПа; умовна межа текучості – 255–274 МПа; відносне залишкове видовження – 10–12 %; модуль пружності Юнга – $72 \cdot 10^9$ Па; коефіцієнт Пуассона – 0,3.

Для виготовлення робочих коліс були розроблені технологічні процеси механічної обробки деталей і складання вузлів, а також оснащення та штампи.

Заготовку ступиці отримували із круга діаметром 250 мм шляхом відрізання дисковою пилою на відрізному круглопильному автоматі моделі 8Г663. Токарні операції виконували на токарному патронно-центровому верстаті 16К20Ф3. Обробку отворів на сходинці ступиці та нарізання в них різьби проводили на вертикально-свердлильному верстаті 2Н118. Шпонковий паз у центральному отворі ступиці отримували на горизонтально-протяжному верстаті 7Б56.

Заготовки (з круглими отворами) заднього диска (кільцевої пластини) вирубували із листа завтовшки 6 мм, переднього диска (кільця) та конічної кришки –

із листа завтовшки 3 мм відповідно на механічних гільйотинних ножицях НД3316. Механічну обробку проводили на токарно-гвинторізному верстаті 166 і на радіально-свердлильному верстаті 2А55. Прямокутні отвори (по три для кожної лопаті) в задньому диску та передньому диску отримували за допомогою пробивного штампа на механічному пресі КГ2132. Формоутворення конічної поверхні кришки (конічної оболонки) проводили ротаційним видавлюванням з використанням матриці, притискного пристрою та ролика на токарно-гвинторізному верстаті 166. Після цього розточували центральний отвір у діаметр 100 мм.

Заготовки лопатей вирубували із листа товщиною 3 мм на механічних гільйотинних ножицях НД3316, після цього їх обробляли на вертикально-фрезерному верстаті 6Р13Ф3. Формоутворення циліндричної поверхні лопаті проводили за допомогою згинального штампа на гідравлічному одностояковому пресі П6320Б.

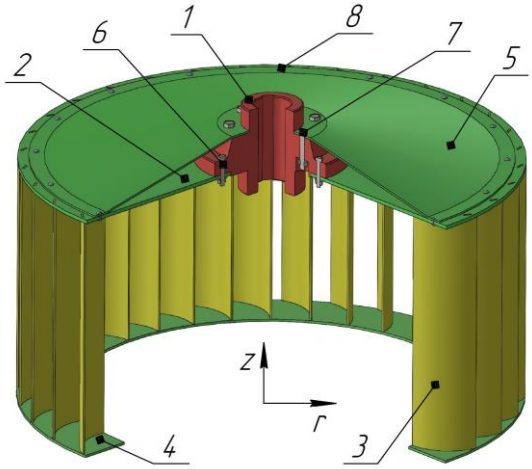


Рис. 1 – Загальний вигляд робочого колеса відцентрового вентилятора: *1* – ступиця; *2* – задній диск (кільцева пластина); *3* – лопаті; *4* – передній диск (кільце); *5* – конічна кришка (конічна оболонка); *6, 7* – болтові з'єднання із гайками; *8* – заклепкове з'єднання.

Технологічний процес складання робочого колеса відцентрового вентилятора (рис. 1) реалізують в два етапи. Спочатку встановлюють виступи лопатей (три з кожного кінця) в периферійні прямокутні отвори заднього та переднього дисків відповідно і розклепують їх торці. Тобто складають «барабан». На другому етапі складання в центральний отвір заднього диска встановлюють ступицю, суміщають периферійні різьбові отвори на її сходинці з отворами цього диска, вставляють у них болти і закручують гайки. Завершуючи процес складання, на ступицю встановлюють конічну кришку, суміщають її отвори із різьбовими отворами в ступиці та з отворами на периферійній частині диска відповідно. До ступиці конічну кришку нерухомо приєднують за допомогою болтових з'єднань із гайками, а до диска – заклепковими з'єднаннями. Після цього проводять технічний контроль якості та точності складання робочого колеса. Далі здійснюють статичне та динамічне балансування робочого колеса.

В процесі виготовлення конічної оболонки можливі різні варіанти отримання величини кута при її вершині. Тому залежно від величини кута при вершині конічної оболонки, за умови сталого лінійного розміру *H* – висоти сходинки ступиці, можливі різні варіанти взаємного розташування деталей перед їх з'єднанням при складанні робочого колеса відцентрового вентилятора (табл. 1).

Таблиця 1

Варіанти взаємного розташування деталей робочого колеса перед їх з'єднанням

Номер варіанта	Кут при вершині конічної оболонки	Розташування конічної кришки відносно*		Складальні напруження
		ступиці	заднього диска	
1	$\alpha < \alpha_н$	−	+	Присутні
2	$\alpha = \alpha_н$	+	+	Відсутні
3	$\alpha > \alpha_н$	+	−	Присутні

*) Примітка: Знак «–» - зазор між деталями; «+» - безпосередній контакт деталей

У першому варіанті складання робочого колеса слід усунути зазор шляхом притискання внутрішнього краю конічної кришки до сходинки ступиці за допомогою болтових з'єднань із гайками. Однак, це призводить до відгинання (відривання) заднього диска та конічної кришки від торцевих поверхонь сходинки ступиці, а також і до збільшення осьового розміру робочого колеса, що є неприйнятним.

У другому варіанті конічна кришка одночасно контактує із торцевою поверхнею сходинки ступиці внутрішнім краєм, а периферійною частиною − із торцевою поверхнею заднього диска. При такому з'єднанні деталей між собою складальні напруження в робочому колесі практично відсутні.

При третьому варіанті складання конічна кришка внутрішнім краєм контактує із торцевою поверхнею сходинки ступиці. Для усунення зазору між периферійними частинами конічної кришки та заднього диска їх попередньо стискають докупи струбцинами і нерухомо з'єднують заклепками. Це, в свою чергу, забезпечує додаткове притискання внутрішнього краю конічної кришки та заднього диска до торцевих поверхонь сходинки ступиці. При цьому осьовий розмір робочого колеса дещо зменшується.

Розробка методики дослідження складальних напружень у робочому колесі відцентрового вентилятора.

Постановка задачі. Розглянемо конструкцію робочого колеса відцентрового вентилятора (рис. 1), яке складається з плоского заднього диска (кільцева пластина) та конічної кришки (конічна оболонка) сталих товщин, жорстко з'єднаних внутрішніми краями із сходинкою ступиці, а зовнішніми краями – між собою. До заднього диска (кільцевої пластини) одним кінцем приклепана система лопатей, які протилежним кінцем приклепані до переднього диска (кільця).

При складанні такої конструкції виникають певні труднощі технологічного характеру, пов'язані з тим, що в процесі виготовлення (формоутворення) конічної поверхні оболонки обробкою тиском (штампуванням чи ротаційним видавлюванням) складно забезпечити отримання стабільного номінального значення

кута при її вершині. Кут при вершині конуса *2* завжди матиме певну похибку. Тому для завеликого кута доводиться при складанні усувати зазор між зовнішніми краями кільцевої пластини і конічної оболонки, а для замалого кута – між внутрішнім краєм конічної оболонки та сходинкою ступиці. Розрахункова схема задачі зображена на рис. 2.

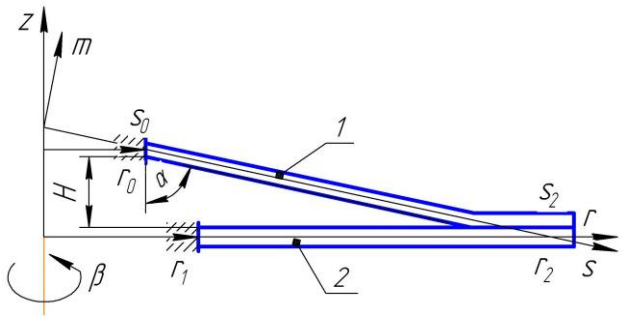


Рис. 2 – Розрахункова схема для визначення складальних напружень в деталях робочого колеса відцентрового вентилятора: *1* – конічна оболонка; *2* – кільцева пластина.

Обидва випадки для малих похибок зводяться до задачі визначення напружень у складеній конструкції робочого колеса із заданим додатнім або від'ємним переміщенням δ :

$$\delta = H\frac{2(\Delta\alpha)}{\sin 2\alpha},$$

де H – висота сходинки ступиці.

Верхню деталь (конічну кришку) моделюємо зрізаною конічною оболонкою, а нижню (задній диск) – кільцевою пластиною сталих товщин. Віднесемо пластину до циліндричної системи координат ($r,\ \beta,\ z$), а для оболонки введемо локальні координати ($s,\ \beta,\ m$), де $s = r/\cos\alpha$ – віддаль від вершини конуса по твірній, m – зовнішня нормаль до поверхні.

Нехай E_1, ν_1 та E_2, ν_2 – модулі Юнга та коефіцієнти Пуассона матеріалів відповідно конічної оболонки та кільцевої пластини, а h_1 та h_2 – їхні товщини.

Математична модель.

1. Диференціальні рівняння сумісності деформацій та рівноваги для конічної оболонки мають вигляд:

$$L(U) - E_1 h_1 V = 0;$$
$$D_1 L(V) + U = 0, \quad s \in (s_0,\ s_2). \qquad (1)$$

Тут $U,\ V$ – функції Мейснера, $L = \left(s\frac{d^2}{ds^2} + \frac{d}{ds} + \frac{1}{s}\right)\mathrm{tg}\,\alpha$ – диференціальний оператор, $D_1 = E_1 h_1^3 / \left(12(1-\nu_1^2)\right)$ – жорсткість на згин.

Сили, моменти, деформації, кут повороту та переміщення через функції $U,\ V$ обчислюються за формулами [14]:

$$N_s = -\frac{U}{s}, \quad N_\beta = -\frac{dU}{ds}, \quad Q_s = \frac{tg\alpha}{s}U;$$
$$M_s = -D_1\left(\frac{dV}{ds} + \nu\frac{V}{s}\right);$$
$$M_\beta = -D_1\left(\frac{V}{s} + \nu\frac{dV}{ds}\right);$$
$$\kappa_s = \frac{dV}{ds}, \quad \kappa_\beta = \frac{V}{s};$$
$$e_s = \frac{1}{E_1 h_1}\left(-\frac{U}{s} + \nu\frac{dU}{ds}\right),$$
$$e_\beta = \frac{1}{E_1 h_1}\left(-\frac{dU}{ds} + \nu\frac{U}{s}\right);$$
$$\vartheta_s = V,\ u_s = C + \int_{s_0}^{s} e_s ds;\ u_n = (u_s - s e_\beta)\,\mathrm{ctg}\,\alpha. \qquad (2)$$

Вирази для обчислення компонент переміщень та зусиль для конічної оболонки у системі координат, пов'язаній з кільцевою пластиною (повернутій на кут α), мають вигляд:

$$u_r = u_s\cos\alpha + u_n\sin\alpha;$$
$$u_z = u_s(-\sin\alpha) + u_n\cos\alpha;$$
$$N_r = N_s\cos\alpha + Q_s\sin\alpha;$$
$$Q_r = N_s(-\sin\alpha) + Q_s\cos\alpha. \qquad (3)$$

2. Диференціальні рівняння рівноваги в переміщеннях для кільцевої пластини:

$$D_2\Delta\Delta u_z = 0;$$
$$E_2 h_2(\Delta u_r - \frac{u_r}{r^2}) = 0, \quad r \in (r_1,\ r_2). \qquad (4)$$

Тут u_r, u_z – відповідно радіальне та вертикальне переміщення, $\Delta = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d}{dr}$ – оператор Лапласа, $D_2 = E_2 h_2^3 / \left(12(1-\nu_2^2)\right)$ – жорсткість на згин.

Кут повороту, зусилля та моменти в кільцевій пластині виражаються через переміщення і розраховуються за формулами [15]:

$$\vartheta_r = \frac{du_z}{dr};$$
$$Q_r = -D\frac{d}{dr}\Delta u_z;$$
$$N_r = \frac{E_2 h_2}{1-\nu_2^2}\left(\frac{du_r}{dr} + \nu\frac{u_r}{r}\right);$$
$$M_r = -D_2\left(\frac{d^2 u_z}{dr^2} + \frac{\nu}{r}\frac{du_z}{dr}\right);$$
$$M_\beta = -D_2\left(\frac{1}{r}\frac{du_z}{dr} + \nu\frac{d^2 u_z}{dr^2}\right). \qquad (5)$$

3. Крайові умови:

а) внутрішній край конічної оболонки $s = s_0$ затиснутий із заданим вертикальним складальним переміщенням (додатнім або від'ємним):

$$u_r = 0,\ u_z = \delta,\ \vartheta_s = 0,\ s = s_0; \qquad (6)$$

б) внутрішній край кільцевої пластини $r = r_1$ затиснутий:

$$u_r = 0,\ u_z = 0,\ \vartheta_r = 0,\ r = r_1; \qquad (7)$$

в) умови спряження зовнішніх країв деталей робочого колеса $s = s_2$, $r = r_2$:

$$u_r\big|_{s=s_2} - u_r\big|_{r=r_2} = 0;$$
$$u_z\big|_{s=s_2} - u_z\big|_{r=r_2} = 0;$$
$$\vartheta_s\big|_{s=s_2} = 0;$$
$$\vartheta_r\big|_{r=r_2} = 0;$$
$$Q_r\big|_{s=s_2} + Q_r\big|_{r=r_2} = 0;$$
$$N_r\big|_{s=s_2} + N_r\big|_{r=r_2} = 0. \quad (8)$$

Тут δ – складальне переміщення.

Загальний розв'язок.

Загальний розв'язок системи диференціальних рівнянь (1) має вигляд:

$$U(\xi) = \sum_{i=1}^{4} C_i \varphi_i(\xi),\ V(\xi) = -\frac{D_1}{\operatorname{tg}\alpha}\sum_{i=1}^{4} C_i \varphi_j(\xi), \quad (9)$$

$$j = i - (-1)^i,\ \xi = 2\lambda\sqrt{s},\ \lambda = \sqrt{\frac{\operatorname{ctg}\alpha}{h_1}}\left(12(1-\nu_1^2)\right)^{1/4},$$

$$\varphi_i(\xi) = \psi_i(\xi) - (-1)^i \frac{2}{\xi}\psi_j'(\xi), \quad (10)$$

де C_i – довільні сталі, функції ψ_i виражаються через функції Кельвіна [14]:

$$\psi_1(\xi) = \operatorname{ber}(\xi),\quad \psi_2(\xi) = -\operatorname{bei}(\xi),$$
$$\psi_3(\xi) = -\frac{2}{\pi}\operatorname{kei}(\xi),\quad \psi_4(\xi) = -\frac{2}{\pi}\operatorname{ker}(\xi).$$

Вирази всіх кінематичних і силових чинників через функції φ_i та ψ_i та їх похідні для конічної оболонки будуть:

$$M_s = -\frac{D_1}{2s}\sum_{i=1}^{4} C_i\left(\xi\psi_i' - 2(1-\nu_1)\varphi_i\right);$$
$$M_\beta = -\frac{D_1}{2s}\sum_{i=1}^{4} C_i\left(\nu_1\xi\psi_i' + 2(1-\nu_1)\varphi_i\right);$$
$$Q_s = -\frac{D_1}{s}\sum_{i=1}^{4} C_i\varphi_j;$$
$$N_s = \frac{D_1}{s\operatorname{tg}\alpha}\sum_{i=1}^{4} C_i\varphi_j(\xi) + \frac{C_5}{s}; \quad (11)$$
$$N_\beta = \frac{D_1}{2s\operatorname{tg}\alpha}\sum_{i=1}^{4} C_i\left(\xi\psi_j' - 2(1-\nu_1)\varphi_j\right);$$
$$E_1h_1e_s = \frac{C_5}{s\sin\alpha\cos\alpha} - \frac{D_1}{2s\operatorname{tg}\alpha}\sum_{i=1}^{4} C_i\left(\nu_1\xi\psi_j' - 2(1+\nu_1)\varphi_j\right);$$
$$E_1h_1e_\beta = -\frac{\nu_1 C_5}{s\sin\alpha\cos\alpha} - \frac{D_1}{\operatorname{tg}\alpha};$$
$$\vartheta_s = \frac{du_n}{ds} = \left(e_s - e_\beta + \frac{1}{E_1h_1}\frac{\nu_1 C_5}{s\sin\alpha\cos\alpha}\right)\operatorname{ctg}\alpha;$$
$$u_s = C_6 + \int_{s_0}^{s} e_s ds;\quad u_n = (u_s - se_\beta)\operatorname{ctg}\alpha. \quad (12)$$

Загальним розв'язком системи рівнянь (2) буде:

$$u_z = C_7 + C_8r^2 + C_9\ln r + C_{10}r^2\ln r;$$
$$u_r = C_{11}r + C_{12}/r. \quad (13)$$

Вирази силових чинників для кільцевої пластини:

$$M_r = -D_2\left(2(1+\nu_2)C_8 - \frac{1-\nu_2}{r^2}C_9 + (3+\nu_2+2(1+\nu_2)\ln r)C_{10}\right);$$
$$M_\beta = -D_2\left(2(1+\nu_2)C_8 + \frac{1-\nu_2}{r^2}C_9 + (1+3\nu_2+2(1+\nu_2)\ln r)C_{10}\right);$$
$$Q_r = 4D_2C_{10}/r;$$
$$N_r = E_2h_2\left(\frac{1}{1-\nu_2}C_{11} - \frac{1}{1+\nu_2}\frac{C_{12}}{r^2}\right). \quad (14)$$

Після підстановки виразів (9)–(14) у крайові умови (6)–(8) одержуємо систему з 12-ти лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження довільних сталих C_i ($i = \overline{1,\ 12}$).

За знайденими зусиллями та моментами підрахували компоненти тензора напружень у конічній оболонці:

$$\sigma_s = \frac{1}{h_1}\left(N_s + \frac{12z}{h_1^2}M_r\right);$$
$$\sigma_\beta = \frac{1}{h_1}\left(N_\beta + \frac{12z}{h_1^2}M_\beta\right);$$
$$\tau_{sn} = \frac{6}{h_1^3}\left(\frac{h_1^2}{4} - n^2\right)Q_s;$$

та в кільцевій пластині:

$$\sigma_r = \frac{1}{h_2}\left(N_r + \frac{12z}{h_2^2}M_r\right);$$
$$\sigma_\beta = \frac{1}{h_2}\left(N_\beta + \frac{12z}{h_2^2}M_\beta\right);$$
$$\tau_{rz} = \frac{6}{h_2^3}\left(\frac{h_2^2}{4} - z^2\right)Q_r.$$

Аналіз результатів дослідження складальних напружень у робочому колесі відцентрового вентилятора. Під час проведення розрахунків прийняли такі геометричні розміри та механічні властивості матеріалу деталей робочого колеса відцентрового вентилятора ВЦ-14-46-8:

– задній диск – зовнішній діаметр 810 мм, внутрішній діаметр отвору 180 мм, товщина 6 мм;

– ступиця – зовнішній діаметр 240 мм, діаметр сходинки 180 мм, висота сходинки 55 мм;

– конічна кришка – зовнішній діаметр 775 мм, внутрішній діаметр отвору 100 мм, товщина 3 мм, кут при вершині конуса $\alpha = 79°16'$;

– деформований алюмінієвий сплав Д16Т: $\sigma_т = 265$ МПа; $E = 72\cdot10^9$ Па; $\nu = 0{,}3$.

При цьому переміщення – складальний зазор (натяг) між периферійними частинами конічної кришки і заднього диска приймали $\delta = 10$ мм або між внутрішнім краєм конічної кришки та сходинки ступиці $\delta = -10$ мм відповідно.

На рис. 3. наведено результати обчислень еквівалентних складальних напружень отриманих з використанням енергетичної теорії міцності (Мізеса): $\sigma_{eq}^{скл} = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_\beta^2 - \sigma_s\sigma_\beta + 3\tau_{sn}^2}$ – для конічної оболонки та $\sigma_{eq}^{скл} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\beta^2 - \sigma_r\sigma_\beta + 3\tau_{rz}^2}$ – для кільцевої пластини.

Найбільші складальні напруження у робочому колесі досягаються на внутрішній межі кільцевої пластини і становлять: при $\delta = 10$ мм $\max\sigma_{eq}^{скл} = 280$ МПа, а при $\delta = -10$ мм – $\max\sigma_{eq}^{скл} = 283$ МПа. В силу геометричної лінійності задачі отриманий результат можна подати у вигляді:

$$\max\sigma_{eq}^{скл} = k\,|\,\delta\,|, \qquad (15)$$

з нормуючим множником $k = \frac{280}{10} = 28{,}0\,\frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$ для додатних δ або $k = \frac{283}{10} = 28{,}3\,\frac{\text{МПа}}{\text{мм}}$ для від'ємних δ.

Нехай $\max\tau$ – найбільші дотичні напруження від експлуатаційного крутного моменту для ідеально зібраної конструкції (без складальних напружень). Еквівалентні напруження від експлуатаційного навантаження, створеного крутним моментом, повинні підкорятися умові міцності:

$$\sqrt{3(\max\tau)^2} \le [\sigma] = \frac{\sigma_т}{n_0}, \qquad (16)$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження, $\sigma_т$ – межа текучості матеріалу заднього диска, n_0 – початковий (проектний) коефіцієнт запасу міцності робочого колеса.

Очевидно, додаткові складальні напруження можуть дещо погіршити ситуацію. Вимагатимемо, щоби у підсумку був забезпечений новий, прийнятний для нас, коефіцієнт запасу міцності $n < n_0$.

Тоді:

$$\sqrt{3(\max\tau)^2 + (\max\sigma_{eq}^{скл})^2} \le \frac{\sigma_т}{n}. \qquad (17)$$

Виключаючи із співвідношень (16), (17) величину $3(\max\tau)^2$, отримуємо величину допустимих складальних напружень в робочому колесі:

$$\max\sigma_{eq}^{скл} \le \sigma_т\sqrt{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_0^2}}. \qquad (18)$$

Ураховуючи вираз (15), дістаємо остаточну оцінку для складального зазору δ:

$$|\,\delta\,| = \frac{\max\sigma_{eq}^{скл}}{k} \le \frac{\sigma_т}{k}\sqrt{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n_0^2}}. \qquad (19)$$

Задамося для прикладу: $\sigma_т = 265$ МПа; $n_0 = 2$; $n = 1{,}2$.

Задамося для прикладу: $\sigma_т = 265$ МПа; $n_0 = 2$; $n = 1{,}2$.

Тоді для розрахованої конструкції у разі додатних δ:

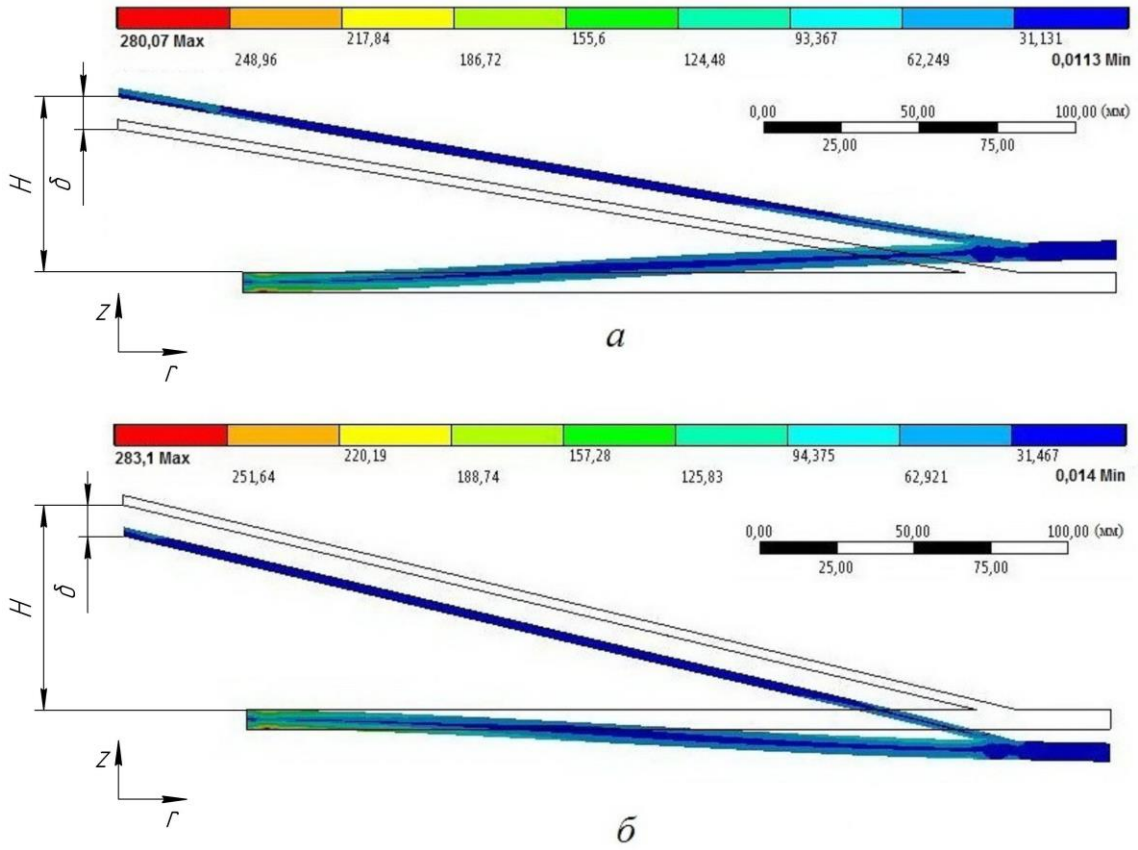


Рис. 3 – Розподіл еквівалентних напружень в робочому колесі, складеному при додатньому (*а*) і від'ємному (*б*) переміщеннях конічної кришки та заднього диска

$$\delta \le \frac{\sigma_т}{28{,}0}\sqrt{\frac{1}{n^2}-\frac{1}{n_0^2}} = \frac{265}{28{,}0}\sqrt{\frac{1}{1{,}2^2}-\frac{1}{2^2}} \approx 6{,}3 \text{ мм},$$

а в разі від'ємних δ :

$$|\delta| \le \frac{\sigma_т}{28{,}3}\sqrt{\frac{1}{n^2}-\frac{1}{n_0^2}} = \frac{265}{28{,}3}\sqrt{\frac{1}{1{,}2^2}-\frac{1}{2^2}} \approx 6{,}2 \text{ мм}.$$

Обговорення результатів. Результати промислових випробовувань робочих коліс відцентрових вентиляторів ВЦ-14-46-8, зібраних за третім варіантом складання – шляхом усунення зазору $\delta = 2...4$ мм між периферійними частинами конічної кришки (конічна оболонка) і заднього диска (кільцева пластина) показали підвищення їх ресурсу роботи порівняно із серійними. Це досягається за рахунок притискання внутрішніх країв деталей до торцевих поверхонь сходинки ступиці.

У подальших дослідженнях напружено-деформованого стану робочого колеса відцентрового вентилятора планується врахувати збільшення жорсткості заднього диска за рахунок приклепування до нього системи лопатей з переднім диском.

Висновки:

1. В рамках класичної теорії пластин та оболонок розроблено математичну модель складеного вузла «задній диск (кільцева пластина) – ступиця – конічна кришка (конічна оболонка)» для робочого колеса відцентрового вентилятора. Розроблена розрахункова схема дозволяє врахувати похибки формоутворення конічної поверхні оболонки і визначити складальні еквівалентні напруження в деталях робочого колеса, залежні від величини зазору чи натягу.

2. Виявлено, що максимальні складальні напруження досягаються у місці з'єднання заднього диска зі ступицею. Знайдено коефіцієнти пропорційності між величиною додатнього (від'ємного) зазорів та максимальними еквівалентними напруженнями.

3. Встановлено нерівності для величини зазорів, за яких складальні напруження в деталях разом з напруженнями від експлуатаційного навантаження не перевищують допустимого значення із заданим коефіцієнтом запасу міцності робочого колеса.

Список літератури:

1. *Беккер А.* Системы вентиляции / *А. Беккер* // Перевод с немецк. Л. Н. Казанцевой. Под ред. *Г. В. Резникова*. – М.: Техносфера, Евроклимат, 2007. – 240 с.
2. *Бабак Г. А.* Шахтные вентиляторные установки главного проветривания: Справочник / *Г. А. Бабак, К. П. Бочаров, А. Т. Волохов* [и др.]. – М.: Недра, 1982. – 296 с.
3. *Новиков М. П.* Основы технологии сборки машин и механизмов / *М. П. Новиков*. 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
4. *Орлов П. И.* Основы конструирования: Справочно-методическое издание в 2-х книгах / *П. И. Орлов*. 3-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 544 с.
5. *Зенкин А. С.* Сборка неподвижных соединений термическими методами / *А. С. Зенкин, Б. М. Арпентьев*. – М.: Машиностроение, 1987. – 128 с.
6. *Шуляр І. О.* Розрахунки з'єднань із натягом у шарошках, оснащених композиційними зубцями зі сталевим хвостовиком / *І. О. Шуляр, І. П. Шацький, В. А. Корнута, Л. Я. Роп'як* // Науковий вісник ІФНТУНГ: всеукр. науково-технічний журнал. – Івано-Франківськ. – 2013. – № 1 (34). – С. 126–133.
7. *Куприянов А. В.* Моделирование прочности соединения с натягом при наличии погрешности геометрии формы / *А. В. Куприянов* // Сборка в машиностроении, приборостроении. – М.: Машиностроение, 2013. – № 5. – С. 41–44.
8. *Лебедь В. Т.* Повышение качества соединения крупногабаритных составных изделий / *В. Т. Лебедь, Н. В. Тарельник, О. Н. Лашкарев, Л. Я. Ропьяк* // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4 (1113). – С. 181–184.
9. *Гинцбург Б. Я.* Теория поршневого кольца / *Б. Я. Гинцбург*. – М.: Машиностроение, 1979. – 271 с.
10. *Пасічник В. А.* Врахування багатоваріантності схем складання на етапі розподілу операцій між обладнанням / *В. А. Пасічник, І. В. Ратушна* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2007. – № 1 (40). – С. 51– 62.
11. *Левин А. В.* Прочность и вибрация лопаток и дисков паровых турбин / *А. В. Левин, К. Н. Боришанский, Е. Д. Консон*. – Л.: Машиностроение, 1981. – 710 с.
12. *Русский Е. Ю.* Анализ прочности шахтных осевых вентиляторов / *Е. Ю. Русский* // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (108). – С. 31–34.
13. *Ropyak L.* Estimation of ultimate loads for clip connection with partial sweep of shaft / *L. Ropyak, I. Shatskyi, A. Velychkovych* // International scientific journal machines.TECHNOLOGIES. Technologies. Materials. – Sofia, Bulgaria. – 2017. – Year XI. – Issue 2. – P. 39–42.
14. *Рекач В. Г.* Руководство к решению задач по теории упругости / *В. Г. Рекач*. – М.: Высшая школа, 1966. – 230 с.
15. *Тимошенко С. П.* Пластины и оболочки / *С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер* // Перевод с англ. *В. И. Контовта*. Под ред. *Г. С. Шапиро*. 2-е изд., стереотип. – М.: Наука, 1966. – 636 с.

Bibliography (transliterated)

1. *Bekker A.* Systemy ventyliatsyy. Perevod s nemetsk. *L. N. Kazantsevoi*. Pod red. H. *V. Reznykova*. Moscow. Tekhnosfera, Evroklymat, 2007. 240 p.
2. *Babak H. A., Bocharov K. P. , Volokhov A. T. and ath.* Shakhtnye ventyliatornye ustanovky hlavnoho provetryvanyia: Spravochnyk. Moscow. Nedra, 1982. 296 p.
3. *Novykov M. P.* Osnovy tekhnolohyy sborky mashyn y mekhanyzmov. Moscow. Mashynostroenye, 1980. 592 p.
4. *Orlov P. Y.* Osnovy konstruyrovanyia: Spravochno-metodycheskoe yzdanye v 2-kh knyhakh. 3-e yzd., yspr. Moscow. Mashynostroenye, 1988. T. 2. 544 p.
5. *Zenkyn A. S., Arpentev B. M.* Sborka nepodvyzhnykh soedynenyi termycheskymy metodamy. Moscow. Mashynostroenye, 1987. 128 p.
6. *Shuliar I. O., Shatskyi I. P. , Kornuta V. A. , Ropiak L. Ya.* Rozrakhunky ziednan iz natiahom u sharoshkakh, osnashchenykh kompozytsiinymy zubtsiamy zi stalevym khvostovykom. Naukovyi visnyk IFNTUNH: vseukr. naukovo-tekhnichnyi zhurnal. – Ivano-Frankivsk. 2013. No 1 (34). pp. 126–133.
7. *Kupryianov A. V.* Modelyrovanye prochnosty soedynenyia s natiahom pry nalychyy pohreshnosty heometryy formy. Sborka v mashynostroenyy, pryborostroenyy. Moscow. Mashynostroenye, 2013. No 5. pp. 41–44.
8. *Lebed V. T., Tarelnyk N. V. , Lashkarev O. N. , Ropyak L. Ya.* Povyshenye kachestva soedynenyia krupnohabarytnykh sostavnykh izdelyi. Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut». Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni. Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. No4 (1113). pp. 181–184.
9. *Hyntsburh B. Ya.* Teoryia porshnevoho koltsa. Moscow. Mashynostroenye, 1979. 271 p.
10. *Pasichnyk V. A., Ratushna I. V.* Vrakhuvannia bahatovariantnosti skhem skladannia na etapi rozpodilu operatsii mizh obladnanniam. Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky. 2007. No 1 (40). pp. 51– 62.
11. *Levyn A. V., Boryshanskyi K. N. , Konson E. D.* Prochnost y vybratsyia lopatok y dyskov parovykh turbyn. Leningrad. Mashynostroenye, 1981. 710 p.
12. *Russkyi E. Yu.* Analyz prochnosty shakhtnykh osevykh ventyliatorov. Vestnyk Kuzbasskoho hosudarstvennoho tekhnycheskoho unyversyteta. 2015. No 2 (108). pp. 31–34.
13. *Ropyak L., Shatskyi I., Velychkovych A.* Estimation of ultimate loads for clip connection with partial sweep of shaft. International scien-

tific journal machines.TECHNOLOGIES. Technologies. Materials. – Sofia, Bulgaria. – 2017. – Year XI. – Issue 2. – P. 39–42.
14. *Rekach V. H.* Rukovodstvo k reshenyiu zadach po teoryy upruhosty. Moscow. Vysshaia shkola, 1966. 230 p.
15. *Tymoshenko S. P., Voinovskyi-Kryher S.* Plastyny y obolochky. Perevod s anhl. *V. Y. Kontovta*. Pod red. H. S. Shapyro. 2-e yzd., stereotyp. Moscow. Nauka, 1966. 636 p.
.

Поступила (received) 12.04.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Складальні напруження в робочому колесі відцентрового вентилятора / Л.Я. Роп'як // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 86–93. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

Сборочные напряжения в рабочем колесе центробежного вентилятора / Л.Я. Ропяк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 86–93. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

Assembly stresses in the impellers of the centrifugal fan / L. Ropyak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P.86–93. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-004X

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Роп'як Любомир Ярославович – канд. техн. наук, с.н.с., доц. Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, тел.: 0505408007, e-mail: l_ropjak@ukr.net;

Ропяк Любомир Ярославович – канд. техн. наук, с.н.с., доц. Ивано-Франковского национального технического университета нефти і газа, тел.: 0505408007, e-mail: l_ropjak@ukr.net;

Ropyak Liubomyr Yaroslavovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, tel.: 050-54-080-07, e-mail: l_ropjak@ukr.net.

УДК 621.923

В.Д. КОВАЛЬОВ, Я.С. АНТОНЕНКО, Б.Ю. ВИГАНЯЙЛО

НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ КРУТНОЇ ЖОРСТКОСТІ СТАНИН ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ

Проведено дослідження крутної жорсткості станин важких токарних верстатів на натурних зразках. Об'єкти досліджень - литі чугунні станини важких токарних верстатів 1А665, 1А670, зварні сталеві станини глибокорозточувального верстата КЖ1910 з товщиною вертикальних стінок δ =12, 16, 18 мм, зварна експериментальна станина верстата токарного типу. Отримано результати питомої крутної податливості досліджуваних станин. Надано рекомендації щодо проектування та модернізації станин важких токарних верстатів.

Ключові слова: важкі токарні верстати, станини, натурні зразки, обертальний момент, питома крутна податливість.

Проведено исследование крутящей жесткости станин тяжелых токарных станков на натурных образцах. Объекты исследований - литые чугунные станины тяжелых токарных станков 1А665, 1А670, сварные стальные станины глубокорасточного станка КЖ1910 с толщиной вертикальных стенок δ = 12, 16, 18 мм, сварная экспериментальная станина станка токарного типа. Получены результаты удельной крутильной податливости исследуемых станин. Даны рекомендации по проектированию и модернизации станин тяжелых токарных станков.

Ключевые слова: тяжелые токарные станки, станины, натурные образцы, крутящий момент, удельная крутильная жесткость.

The researches of twisting stiffness of the stands of heavy lathes on the natural samples have been conducted. The objects of research are cast-iron stands of heavy lathes 1A665, 1A670, welded steel stands of deep-cutting machine КЖ1910 with thickness of vertical walls δ = 12, 16, 18 mm, welded experimental frame of machine-tools of turning type. The results of specific twisting pliability of the studied frames were obtained. The recommendations for designing and upgrading the stands of heavy lathes were given.

Keywords: heavy lathes, stands, natural samples, torque, specific twisting pliability.

Постановка проблеми. При проектуванні, експлуатації і модернізації металорізального обладнання виникає необхідність підвищення їх точностних характеристик. Особливо актуальним це питання являється для важких токарних верстатів, у яких силові деформації несучої системи призводять до значного зниження точності обробки та вимагають розробки спеціальних методів її забезпечення. Жорсткість несучих систем важких токарних верстатів багато в чому визначає точність обробки великогабаритних деталей. Тому, дослідження жорсткості несучої системи верстатів з точки зору підвищення точності важких токарних верстатів є актуальною проблемою сучасного машинобудування.

Мета роботи – отримання експериментальних даних по жорсткості станин для рекомендацій щодо проектування і модернізації важких токарних верстатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА) більш ніж 40 років проводяться роботи по дослідженню та розробці нових конструкцій верстатів, підвищенню їх точності, працездатності, ефективності. При створенні верстатів нового покоління проведено ряд науково-дослідних робіт по підвищенню точності, удосконаленню компонування верстатів, зниженню їх металоємності, оптимізації конструкції окремих вузлів, розробці нових адаптивних систем керування, розробці опорних вузлів.

Питанню вибору параметрів станин токарних верстатів за критерієм крутної жорсткості присвячено роботу [1], у якій запропоновано різні теоретичні рішення. Проведена авторами робота основана на реальних дослідженнях станин важких токарних верстатів в умовах виробництва і дозволяє зробити достовірний прогноз досяжної точності обробки як реалізації вимог завдання на проектування, що визначає її актуальність.

Виклад основного матеріалу. Процеси обробки металів зі зняттям стружки є на сьогоднішній день найважливішими способами формоутворення. Основними завданнями, що стоять перед машинобудуванням сьогодні, є задачі збільшення точності, надійності та продуктивності верстатних систем з одночасним зниженням собівартості та часу виготовлення деталі. На сьогодні проблему досягнення потрібної точності можна вважати найбільш важливою при проектуванні нових моделей машинобудування, оскільки саме в цій області розробники стикаються з найбільшим числом непереборних труднощів, що заважають шукати обхідні шляхи, йти на компроміси, що, у кінцевому рахунку, позначається на загальній якості і конкурентоспроможності нової продукції. Потрібно враховувати реальну динамічну структуру верстата та її вплив на траєкторії формоутворюючих рухів, так як при цьому виникає необхідність аналізу багатьох факторів, таких як зміни жорсткості заготовки та несучої системи верстата, температури та явищ, пов'язаних з нею, зносу ріжучого інструменту та багато іншого. Несучі системи верстатів повинні забезпечувати і зберігати протягом необхідного терміну служби правильне розташування і можливість точних і плавних взаємних переміщень інструменту і виробів вхолосту і при різанні. Для забезпечення цих вимог конструювання станин і корпусних деталей в даний час підпорядковується критеріям жорсткості деталей і зносостійкості напрямних, а також умовам технологічності. Вплив жорсткості станин і корпусних деталей на роботу механізмів верстата визначається перерозподілом тисків в сполученнях і порушенням умов правильного контакту в результаті пружних деформацій елементів системи.

При виробництві базових деталей верстатів, основними з яких є станини, використовується ливарний чугун. Основними технологічними умовами виробництва таких конструкцій є простота виготовлення моделей, простота формовки, але для виготовлення

© В.Д. Ковальов, Я.С. Антоненко, Б.Ю. Виганяйло,2017

великогабаритних станин важких токарних верстатів, ми стикаємось із рядом труднощів, таких як складність отримання відливки зі збереженням постійності властивостей матеріалу по всьому обсязі відливки; складність отримання тонкостінних перегородок, що значно знижує металоємність, висока складність виправлення дефектів виробництва. На відміну від литих, застосування зварних конструкцій особливо ефективно для деталей, розміри яких значною мірою визначаються допустимими прогинами під власною вагою.

До переваг зварних конструкцій у порівнянні із литими відносять: менша вага (до 2 разів) у наслідок більшого модуля пружності сталі, ніж чугуна, можливості застосування більш досконалих з точки зору жорсткості форм, менша трудомісткість механічної обробки, можливість виправлення дефектів конструкції, прискорення процесу виробництва, за рахунок чого підвищується конкурентоспроможність виготовленого верстата. Зварні станини, що мають однакові у порівнянні із литими габарити перетинів, при значно меншій, ніж у литих вазі, можуть бути виконані з більш високою жорсткістю.

З метою визначення оптимальної конструкції станини проведено дослідження на натурних зразках. Об'єктом досліджень були: литі чугунні станини важких токарних верстатів 1А665, 1А670, зварні сталеві станини глибокорозточувального верстата КЖ1910 з товщиною вертикальних стінок δ =12, 16, 18 мм, зварна експериментальна станина верстата токарного типу.

Випробування проводилися на ПАТ КЗВВ у механоскладальних цехах №5, №6. У ході роботи було виміряно кути закруглення секцій станин при прикладанні до торця обертального моменту. Для прикладення до торця секції станини крутного моменту була виготовлена навантажувальна рама (рис. 1 і 2).

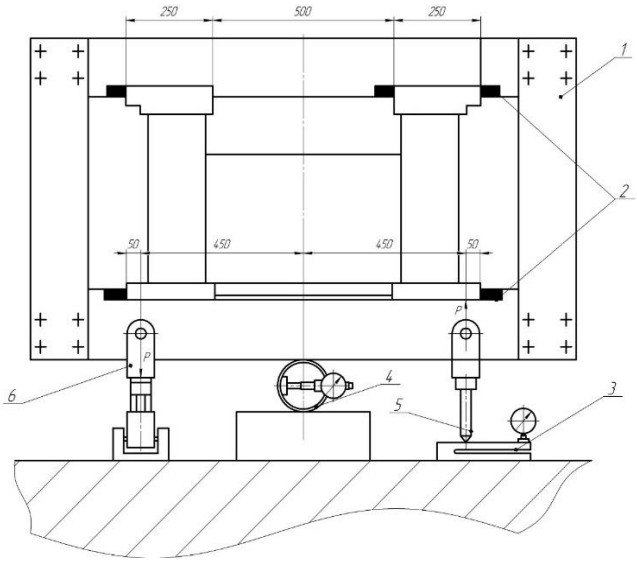


Рис 1 – Схема навантаження зварної станини крутним моментом: 1-навантажувальна рама; 2-компенсатори; 3,4-динамометри; 5-домкрат; 6-стяжка

Для запобігання спотворення навантажувального перетину станини на другому кінці застосовувалася аналогічна по конструкції рама.

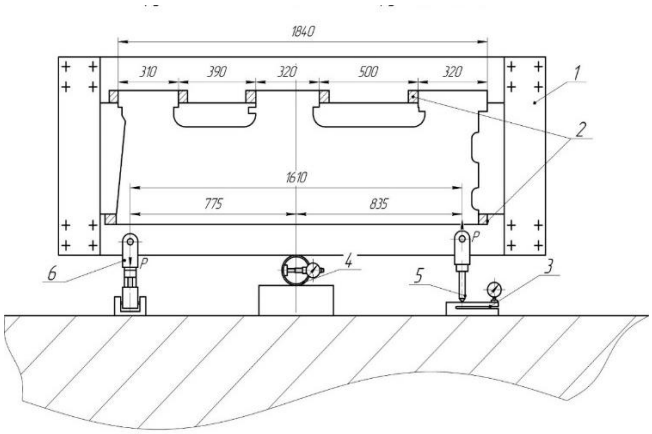


Рис. 2 – Схема навантаження станини верстата 1А665 крутним моментом: 1-навантажувальна рама; 2-компенсатори; 3,4-динамометри; 5-домкрат; 6-стяжка

Рами за допомогою компенсаторів 2 щільно замикали полки напрямних і підошву станини. Навантажувальна рама спиралася на кільцевій динамометр 4. Другий кінець станини закріплювався фундаментними болтами до тумби, а тумба до фундаменту. Навантаження станини крутним моментом за допомогою домкрата 5 і стяжки 6 одночасно проводилося таким чином, що показання індикатора на кільцевому динамометрі 4 залишалося незмінним. Величин, навантаження визначалася динамометром 3. Кут закручування секції станини визначався за допомогою високопрецизійного клінометра 3 (ТВ-90), встановленого на контрольній лінійці 4 (рис. 3).

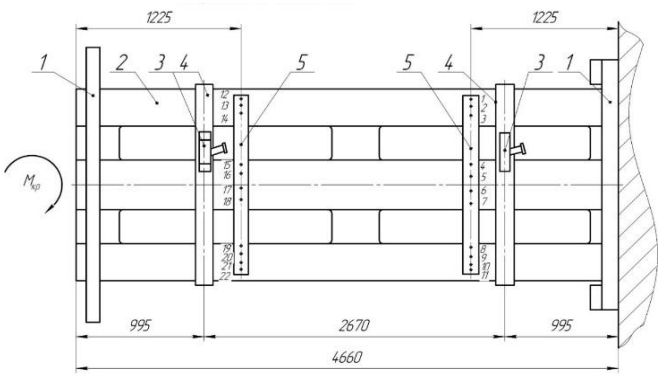


Рис. 3 – Вимірювання кута закручування і спотворення дзеркала напрямних секції станини верстата 1А665: 1-навантажувальна рама; 2-секція станини; 3-високопрецизійний клінометр ТВ-90; 4-контрольна лінійка L=2м; 5-оптична лінійка ІС-36М

Для визначення зміни профілю дзеркала напрямних у вертикальній площині в поперечному напрямку поруч з клінометром встановлювалася оптична лінійка 5 (ІС-36М), за допомогою якої вимірювався профіль напрямних до і після прикладення навантаження. Заміри по номерах точки за схемою вимірювання (рис.3) показали, що зміни профілю при закручуванні практично не відбувалися. Кут закручування визначався як різниця кутів повороту перетину II і перетину I при кожному ступені навантажування. (табл. 1)

Таблиця 1

Зміна положень полок секції станини верстата 1А665 у розрізі І-І при її закручуванні у замірах оптичною лінійкою ІС-36М

Відлік координати заміру за шкалою ІС-36М	0	50	100	600	650	705	760	1420	1470	1520	1540
Номер точки за схемою вимірювання	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Навантаження на станину Мкр=0											
Середній (із 3-х вимірювань) показник ІС-36М в мкм	7	7	3,5	-6	-6	-8	-10	2	3	5,5	7
Відхилення від прямолінійності, мкм	0	0	-3,5	-13	-13	-15	-17	-5	-4	-1,5	0
Навантаження на станину Мкр=805 Нм											
Середній (із 3-х вимірювань) показник ІС-36М в мкм	8	8	8	-4	-6,5	-8,5	-11	2	5	5	8
Відхилення від прямолінійності, мкм	0	0	0	-12	-14,5	-16,5	-19	-6	-3	-3	0
Зміна положень полиць по відношенню до початкового	0	0	3,5	1	-1,5	-1,5	-2	-1	1	-1,5	0
Навантаження на станину Мкр=5220 Нм											
Середній (із 3-х вимірювань) показник ІС-36М в мкм	4,5	3	1,5	-9	-11	-13,5	-14,5	2,5	4	4	4,5
Відхилення від прямолінійності, мкм	0	-1,5	-3	-13,5	-15,5	-18	-19	-2	-0,5	-0,5	0
Зміна положень полиць по відношенню до початкового	0	-1,5	0,5	-0,5	2,5	-3	-2	3	3,5	1	0
Навантаження на станину Мкр=8850 Нм											
Середній (із 3-х вимірювань) показник ІС-36М в мкм	4,5	4	0,5	-11	-13	-15,5	-17,5	5	5	5	4,5
Відхилення від прямолінійності, мкм	0	-0,5	-4	-15,5	-17,5	-20	-22	0,5	0,5	0,5	0
Зміна положень полиць по відношенню до початков.	0	0,5	-0,5	-2,5	-4,5	-5	-5	5,5	4,5	2	0

На рис. 4 представлена питома крутна податливість секції станини верстата 1А665.

Було отримано результати питомої крутної податливості зварних станин верстата КЖ 1910 з різною товщиною вертикальних стінок, зварної експериментальної станини токарного типу з відкритим та закритим профілем поперечних перемичок (рис. 5).

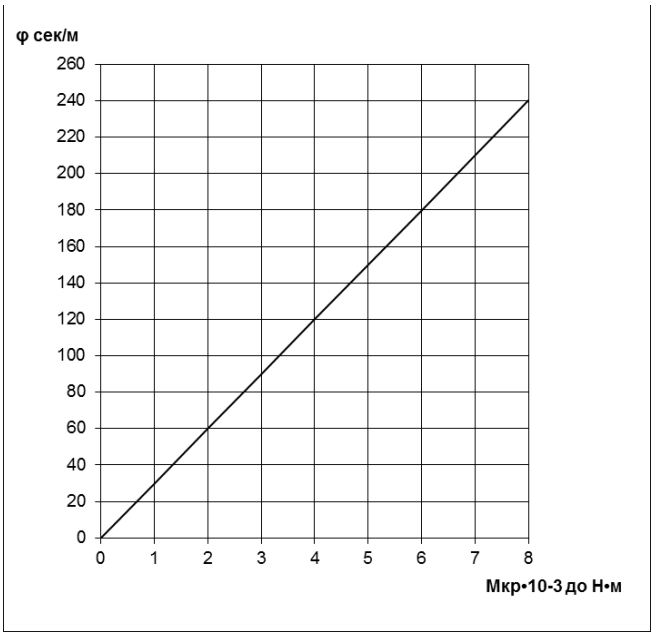


Рис 4. – Питома крутна податливість секції станини верстата 1А665

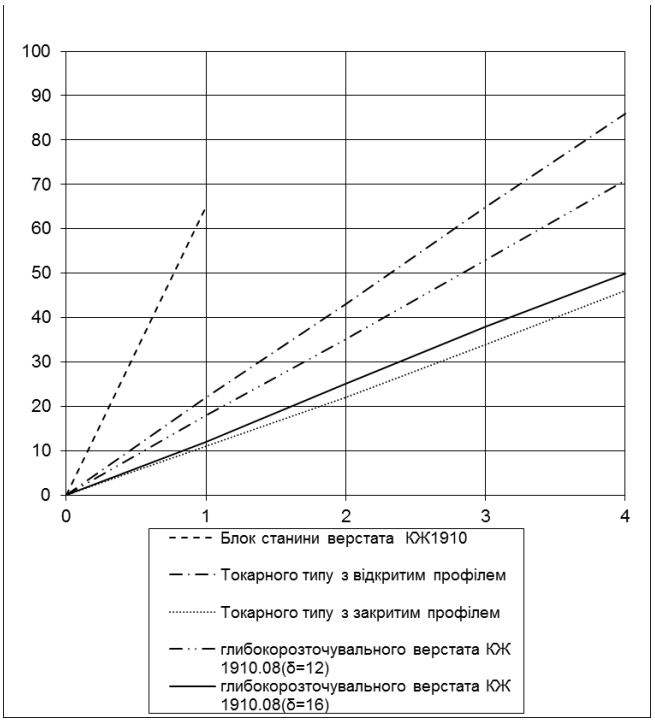


Рис. 5 – Питома крутна податливість зварних станин різного типу

Тут же представлена питома крутна податливість одного блоку станини верстата КЖ 1910. Експериментальна станина виконана з двох таких блоків.

Для оцінки точності вимірювання деформацій станини в вертикальній площині було вироблено вимір прямолінійності дзеркала напрямної однієї секції станини верстата 1А665 довжиною 4,66 м двома методами оптичною лінійкою ІС-36М кроковим методом і приладом контролю прямолінійності ПКП-1М. Ціна ділення вимірювальної шкали обох приладів - 2 мкм. Отримані результати вимірювання зображені на

рис.6. Максімальна розбіжність величин відхилення від прямолінійності склала 16 %.

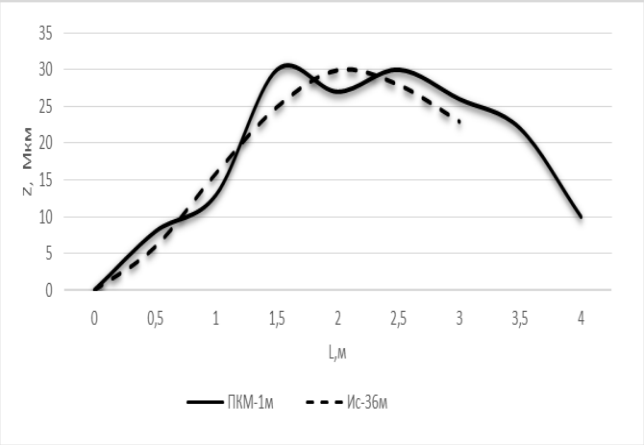


Рис.6 – Порівняння точності методів вимірювання прямолінійності поздовжнього профілю напрямних станини

Висновки.

Жорсткість базових деталей істотно впливає на стабільність процесу різання. Це особливо важливо у зв'язку із зростаючим випуском верстатів з ЧПК, що дозволяють вести обробку на підвищених режимах різання.

В результаті випробувань було заміряно зміни профілю дзеркала напрямних литої станини верстата 1А665 при крутінні в реальних виробничих умовах, заміри показали, що зміни профілю практично не відбувались. Максимальне відхилення положення полиць по відношенню до початкового склало 7,5 мкм. Проаналізовано питому крутильну податливість тотожних по формі литої та зварної станини. Виявлено, що жорсткість на кручення зварної станини у станини у 3-3,5 рази вище, що позитивно впливає на продуктивність різання і точність обробки, але ступінь демпфування у порівнянні із литою - нижче.

Аналізуючи вплив окремих параметрів на податливість несучої системи важкого токарного верстата, можна встановити оптимальну з точки зору жорсткості, ваги, форми і конструкції компоновку. Раціональні області застосування литих та зварних базових деталей у важких верстатах визначаються залежно від їх маси, обсягу виробництва, трудомісткості виготовлення. Планується проведення подальших досліджень станин важких верстатів у умовах виробництва, з метою отримання вичерпних даних щодо жорсткості несучої системи, та її впливу на точність виготовлення виробів на важких токарних верстатах.

Підвищення продуктивності, точності продукції можливо при реалізації комплексу заходів, спрямованих на раціоналізацію методів розрахунку (у тому числі за допомогою методу кінцевих елементів) та проектування зварних конструкцій з урахуванням вимог уніфікації та стандартизації

Список литературы

1 *Шульдешов А.С.* Выбор параметров станин токарных станков по критерию максимальной крутильной жесткости дис. канд.техн. наук. Ростов-на-Дону, 2003.

2 *Еникеев Х.М.* Методы повышения жесткости станин токарных станков. М.: Труды ЭНИМС, вып. 1, ЦБТИ МС,1948.

3 *Peters E.*, Neue Versteifungsbauart fur Werkzengmaschinenbet-ten/Werkstattstechnik H.16. 1920 (Петере Е. Конструкции элементов жесткости для станин станков)

4 *В.В. Каминская, З.М. Левина, Д.Н. Решетов.* Станины и корпусные детали металлорежущих станков/ Под ред. Д.Н. Решетова. – М.:Машгиз, 1960. – 365с.

Bibliography (translitered)

1. Shuldeshov A.S. Vybor parametrov stanin tokarnich stankov po kriteriyu maksimalnoy krutilnoy gestkosti *[Selection of parameters of frames of lathes by the criterion of maximum torsional stiffness]* dis. cand. techn. nauk Rostov-na-Donu, 2003.
2. Enikeev H.M. *Metody povisheniya gestkosti stanin tokarnich stankov*. [Methods of increasing the rigidity of frames of lathes machines.] Moscow . Trudy ENIMS, Issye. 1, TsBTI MS, 1948.
3. Peters E., Neue Versteifungsbauart fur Werkzengmaschinenbet-ten / Werkstattstechnik H.16. 1920 [*Petere E. Konstrukcii elementov gestkosti dlya stanin stankov*].
4. V.V. Kaminskaya, Z.M. Levina, D.N. Reshetov. Staniny i korpusniye detail metalloregushich stankov [*Structures and main parts of metal-cutting machines*]. Moscow. Mashgiz, 1960. 365 p.

Поступила (received) 17.04.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Натурні випробування крутної жорсткості станин важких токарних верстатів / В.Д. Ковальов, Я.С. Антоненко, Б.Ю. Виганяйло // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 94–98. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X**.**

Натурные испытания крутящий жесткости станин тяжелых токарных станков / В.Д. Ковалев, Я.С. Антоненко, Б.Ю. Виганяйло // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 94–98. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Full-scale tests of the stiffening rigidity of heavy-duty lathe lathes / V. Kovalev, Y. Antonenko, B. Viganailo // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.94–98. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковальов Віктор Дмитрович **-** доктор технічних наук, професор, ректор Донбаської державної машинобудівної академії, Краматорськ; тел.: (06264) 41-47-82; e-mail: viktor.kovalov@gmail.com;

Ковалев Виктор Дмитриевич **-** доктор технических наук, профессор, ректор Донбасской государственной машиностроительной академии, Краматорск; тел.: (06264) 41-47-82; e-mail: viktor.kovalov@gmail.com;

Kovalov Viktor Dmitrovich - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, rector of Donbass state mashinebuilding academy, Kramatorsk; tel.: (06264) 41-47-82; e-mail: viktor.kovalov@gmail.com;

Антоненко Яна Сергіївна **–** асистент кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструменту і технологій ДДМА, Краматорськ; тел.: (06264) 41-47-82; e-mail: yana.s.antonenko@gmail.com;

Антоненко Яна Сергеевна **–** ассистент кафедры компьютеризированных мехатронных систем, инструментов и технологий ДДМА, Краматорск; тел.: (06264) 41-47-82; e-mail: yana.s.antonenko@gmail.com;

Antonenko Yana Sergiyivna - assistant of the Department of Computer Mechatronic Systems, Engineering and Technology DDMA, Kramatorsk; tel .: (06264) 41-47-82; e mail: yana.s.antonenko@gmail.com;

Виганяйло Богдан Юрійович – магістр кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструменту і технологій ДДМА, Краматорськ; тел.: (06264) 41-47-82; e-mail: kenaa06@gmail.com;

Выганяйло Богдан Юрьевич – магистр кафедры компьютеризированных мехатронных систем, инструментов и технологий ДДМА, Краматорск; тел.: (06264) 41-47-82; e-mail: kenaa06@gmail.com;

Viganyailo Bogdan Yuriovych – master of the Department of Computer Mechatronic Systems, Engineering and Technology DDMA, Kramatorsk; tel . (06264) 41-47-82; e-mail: kenaa06@gmail.com.

УДК 621.9.01

И.Э. ЯКОВЕНКО, А. А. ПЕРМЯКОВ

РАНЖИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПОНОВОК АГРЕГАТИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ БЛОКОВ

Розглянуто питання вибору силових агрегатів для реалізації технологічних компонувань інструментальних блоків для агрегатованого обладнання з метою формалізації процесу проектування спеціального обладнання. Дослідження використовує геометричні та енергетичні параметри уніфікованих силових вузлів різних конструкцій і варіантів забезпечення кінематики основного і допоміжного руху різання. Запропоновано математичну модель у вигляді послідовності спрямованого перебору варіантів конструкторської реалізації технологічних компонувань інструментальних блоків.

Ключові слова: технологічна компоновка, інструментальний блок, агрегатний обладнання, силовий агрегат.

Рассмотрены вопросы выбора силовых агрегатов для реализации технологических компоновок инструментальных блоков для агрегатированного оборудования с целью формализации процесса проектирования специального оборудования. Исследование затрагивает геометрические и энергетические параметры унифицированных силовых узлов различных конструкций и вариантов обеспечения кинематики основного и вспомогательного движения резания. Предложена укрупненная математическая модель в виде последовательности направленного перебора вариантов конструкторской реализации технологических компоновок инструментальных блоков.

Ключевые слова: технологическая компоновка, инструментальный блок, агрегатное оборудование, силовой агрегат.

The questions of a choice of power units for realization of technological layouts of tool blocks for the aggregated equipment with the purpose of formalization of process of designing of the special equipment are considered. The study touches upon the geometric and energy parameters of unified power units of various designs and variants of providing the kinematics of the main and auxiliary cutting motion. During the research, the existing practice of designing equipment of this class and statistical studies of previously produced machines were used. An enlarged mathematical model is proposed in the form of a sequence of directed enumeration of variants of the design realization of technological layouts of instrumental blocks.

Keywords: Technological layout, instrument block, aggregate equipment, power unit.

Введение. В процессе обработки на агрегатированном оборудовании (АО) одной из наиболее актуальных задач является автоматизация выбора оптимального варианта технологической компоновки станка на ранних стадиях процесса проектирования, что в последующем в совокупности с параметрической оптимизацией позволит сократить технологическую себестоимость выпуска изделия. Многообразие номенклатуры и геометрических форм деталей, обрабатываемых на агрегатированном оборудовании обусловливает множество конструктивных и компоновочных решений. Наиболее характерной для этого класса оборудования является обработка концевым мерным инструментом внутренних цилиндрических (47%), конических (27% с учетом фасок) и резьбовых поверхностей (21%) со среднестатистическим числом обрабатываемых поверхностей $Kпв$=9,4 и числом сторон обработки Kco=2,4. Такое многообразие обрабатываемых поверхностей предполагает очень большое количество вариантов технологических компоновок АО. Это определяет ряд характерных особенностей компоновочного, конструкторского, кинематического, инструментального плана. Просмотр всех технически реализуемых вариантов структур технологической компоновки практически невозможен. Поэтому необходимо установить и классифицировать основные факторы, влияющие на последующую техническую реализацию, что даст возможность ранжировать эти варианты по перспективности использования с точки зрения критерия оптимальности еще на ранних стадиях проектирования.

Анализ исследований и литературы. Вопросам проектирования технологических компоновок уделялось большое внимание. Так в [1] рассмотрены общие вопросы проектирования технологических компоновок агрегатных станков. В работе [2] детально рассматривались компоновочные решения инструментальных блоков для токарной обработки с точки зрения, как структурной, так и параметрической оптимизации. Особенно это относится к учету факторов, которые определяются структурной компоновкой инструментального блока (длины резания инструмента и длины рабочих ходов инструментального блока, требуемый такт выпуска и др.), при назначении параметров резания для каждого инструмента. В работах [3-4] детально рассмотрены и сгруппированы факторы, оказывающие влияние на перспективность использования технологической компоновки инструментального блока и многопозиционного станка в целом. В зависимости от степени влияния этих факторов предложены принципы ранжирования вариантов технологических компоновок с точки зрения последующей конструкторской реализации. Однако рассматриваются только общие компоновочные факторы, которые не учитывают геометрические и силовые характеристики конструкций унифицированных силовых агрегатов.

Целью данной статьи является выявление и исследование факторов, влияющих на ранжирование возможных вариантов технологических компоновок инструментальных блоков при обработке концевым инструментом на агрегатированном оборудовании на ранних стадиях проектирования.

Постановка проблемы. Автоматизация проектирования специализированного агрегатированного оборудования выдвигает требование формализации процесса выбора возможных вариантов последующей конструкторской реализации, что позволяет осуществить структурно-параметрическую оптимизацию АО в целом. Рассматриваемые методики проектирования АО основаны на субъективном опыте конструкторов, слабо формализованы и не могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования.

© И.Э. Яковенко, А. А. Пермяков, 2017

Материалы исследований. В качестве объекта исследования был рассмотрен процесс проектирования инструментальных наладок агрегатированного оборудования на базе унифицированных силовых узлов различной кинематики, конфигурации и геометрических параметров. Процесс разработки вариантов технологической компоновки обработки детали на АО не входит в круг исследований данной статьи. Варианты объединения инструментов в блоки используются в качестве исходной информации.

Ранжирование технически реализуемых вариантов ТК инструментальных блоков в процессе поиска рационального решения. Ранжирование вариантов структур технологических компоновок заключается в оценке различных условий процесса резания и эксплуатации АО, соответствие которым с большей вероятностью может обеспечить оптимальное значение выбранного целевого функционала. Такое ранжирование осуществляется на основании анализа составляющих критерия оптимальности, типовых проектных решений, закономерностей технологии машиностроения и экспериментальных исследований.

Максимальная концентрация инструментов в блоки сокращает количество используемых силовых агрегатов и позиций обработки, минимизирует площадь оборудования и т.д. Из вариантов, равнозначных с точки зрения концентрации операций, более предпочтительным является тот, в инструментальном блоке которого объединены инструменты, принадлежащие одному комплекту, под которым понимается совокупность режущих инструментов, имеющих одинаковую конфигурацию и обрабатывающих поверхности (элементарные или соосные) с одинаковыми размерами и качественными характеристиками. При объединении в блоке инструментов разных комплектов предпочтение отдается варианту с инструментами одного типа. В этих случаях необходимо учитывать значение допуска на межосевое расстояние: чем он меньше, тем перспективнее рассматриваемый вариант. При высокой точности межосевого расстояния между обрабатываемыми поверхностями объединение инструментов в один инструментальный блок обязательно, и поэтому данная характеристика ранжирования рассматривается при синтезе вариантов технологической компоновки, как ограничивающий фактор.

В случае объединения инструментов различных типов наиболее перспективным является вариант, в котором точность получаемых поверхностей одинакова или незначительно отличается. Такое условие характеризует качественные параметры АО и позволяет снижать возможные трудозатраты, связанные с наладкой, а в дальнейшем и с эксплуатацией оборудования, особенно повышенной точности.

Рассмотренные условия позволяют организовать последовательность анализа вариантов компоновки инструментальных блоков в процессе параметрической оптимизации и последующей конструкторской реализации. Однако достаточно широкий спектр типоразмеров силовых агрегатов требует еще на ранних стадиях проектирования учитывать такие характеристики, как типы циклограмм движения, длина рабочего хода узла, допустимые энергетические нагрузки. Поэтому в процессе выбора конкретных типоразмеров силовых узлов необходимо сопоставлять суммарные характеристики инструментального блока с геометрическими и силовыми характеристиками силового агрегата. Причем, в процессе выбора силовых узлов допустимо манипулировать только силовыми характеристиками за счет изменения режимов резания инструментов, входящих в рассматриваемый инструментальный блок без изменения структуры рассматриваемого варианта компоновки. Так как типоразмеры выбранных силовых агрегатов оказывают существенное влияние на значение целевого функционала рассмотрим более подробно выбор силовых агрегатов по допускаемым нагрузкам при выполнении прочих ограничений.

Крутящий момент на выходном валу силовой головки или редуктора коробки во многом определяется конструкцией многошпиндельной насадки или коробки и, как показали исследования, практически всегда меньше допустимого по техническим характеристикам, поэтому выбор силового узла осуществляется по допустимому осевому усилию с проверкой по крутящему моменту и максимальной величине хода силового узла. Выбор габарита (типоразмера) силового узла осуществляется на основании суммарных осевых нагрузок (в зависимости от типа циклограммы) по условию

$$\sum_{jk=1}^{J_k} P_{ocjk} \leq \left[P_{\text{доп}_m}\right] \quad , \qquad (1)$$

где $\left[P_{\text{доп}_m}\right]$ –допускаемое усилие для силового узла m-го габарита, Н;

P_{ocjk} – осевое усилие резание j-го инструмента k-го силового блока, Н.

В этом случае коэффициент использования силового агрегата по допускаемому усилию

$$\rho_k = \frac{\sum_{jk=1}^{J_k} P_{ocjk}}{\left[P_{\text{доп}_m}\right]} \quad , \qquad (2)$$

где ρ_k коэффициент использования по допускаемому усилию.

Суммарная осевая нагрузка инструментального блока рассматриваемого варианта технологической компоновки определяется для момента времени, когда все инструменты блока производят обработку, что соответствует принципу достижения максимальной производительности обработки на каждой позиции (т.е. осуществляется параллельная обработка всех поверхностей).

В случае невыполнения условия для рассматриваемого варианта инструментального блока возможны различные варианты решения. Наиболее простым из них является переход к следующему габариту силового узла, что во многих случаях невозможно по конструктивным соображениям: не реализуется конструкторская компоновка всего станка в целом, невыполнима расчетная циклограмма движения и др. С другой стороны, даже когда выбор узла следующего габарита возможен, такое решение не всегда прием-

лемо, так как ведет к повышению стоимости станка и снижению его эффективности, а в некоторых случаях практически неосуществимо. Изменение технологической компоновки АО (дифференциация обработки по разным позициям или введение дополнительных позиций), может иметь те же последствия.

Остальные способы связаны с уменьшением осевого усилия, возникающего в процессе резания. Изменение геометрии инструмента (в основном это касается сверл) позволяет сократить осевое усилие до 30% и является наиболее простым способом корректировки варианта. При этом каждой форме заточки или геометрии режущего клина соответствует определенный коэффициент снижения осевого усилия *Кр* по сравнению с условиями, принятыми при расчете для стандартного инструмента. Однако в этом случае возрастают затраты, связанные с переточкой инструмента.

Для тех вариантов, когда

$$\rho_k \le \frac{1}{\min\{K_{pjk}\}} \qquad (3)$$

где $\min\{K_{pjk}\}$ – минимально возможный коэффициент снижения осевого усилия, обусловленного геометрией режущего инструмента.

Наиболее целесообразно рассматривать инструменты или группы инструментов с максимальными значениями ρ_k. Эти значения соответствуют максимальному диаметру инструмента, для которого наиболее просто осуществить оптимизацию геометрических параметров. В противном случае изменение геометрии осуществляется совместно с другими мероприятиями для всех инструментов, входящих в силовой агрегат (для которых это целесообразно и возможно). Однако очень часто такая оптимизация невозможна из-за организации производства на заводе-заказчике станка, либо по каким-то другим причинам.

Снижение осевого усилия достигается также за счет организации параллельно-последовательной или последовательной обработки. Такая обработка возможна при формировании открытых поверхностей (обработка "на проход") и отсутствии ограничений на дополнительный выход инструмента, что в то же время усложняет конструкцию комбинированного инструмента, если он применяется, и увеличивает время обработки, то есть снижает эффективность использования инструмента на лимитирующих позициях.

Наиболее часто на практике применяется метод снижения осевого усилия за счет изменения режимов резания (уменьшения подачи инструмента). Рассмотрим его более подробно. На агрегатированном оборудовании 90% многошпиндельной обработки составляет обработка однотипным инструментом, а комбинированный инструмент обычно также представляет собой совокупность нескольких участков инструмента одного типа (ступенчатые сверло, зенкер, развертка и др.). Очевидно, что минутная подача однотипных инструментов различного диаметра определяется минутной подачей инструментального блока, которая определяется условиями обработки заготовки. Это особенно характерно для операций сверления, которые являются наиболее энергоемкими для концевой обработки и позволяет легко реализовать многоинструментную обработку при невыполнении условия (1). Таким образом, можно откорректировать значения подач инструментов, входящих в инструментальный блок, так, чтобы условие выполнялось, а повышение себестоимости обработки, связанное со снижением подачи инструментов в блоке, было минимальным. Выбор окончательных значений режимов обработки инструментов в блоке производится в процессе параметрической оптимизации (естественно с учетом параметров установленных на этапе просмотра и ранжирования вариантов структур инструментальных блоков) и не является целью исследования данной статьи.

Для каждого инструмента в суммарном осевом усилии нагружающем силовой агрегат, с учетом его влияния на производительность, по отношению к принятому в качестве базового инструмента, имеющему минимальное осевое усилие, определяется как

$$\sigma_{jk} = \left(\frac{P_{ocjk}}{P_{бjk}}\right)^{K_{обpjk}} \cdot \left(\frac{t_{pjkб}}{t_{pjk}}\right)^{\mu_{jk}}, \qquad (4)$$

$$P_{бjk} = \min\{P_{ocjk}\} \quad \forall j_k \in J_k, \qquad (5)$$

где $P_{бjk}, P_{ocjk}$ – осевое усилие базового и j_k-го инструментов соответственно, Н;

$t_{бjk}$, t_{pjk} - время резания базового и j_k-го инструментов без учета объединения в силовой агрегат соответственно, мин;

μ_{jk} – поправочный коэффициент учитывающий влияние скорости резания на стойкость j_k-го инструмента;

$K_{обpjk}$ – поправочный коэффициент, учитывающий вид обработки (тип режущего инструмента) по отношению к базовому.

В качестве примера в таблице 1 приведены поправочные коэффициенты $K_{обpjk}$ для различных видов обработки, полученные эмпирически на основании анализа вариантов объединения различных видов концевых инструментов из быстрорежущей стали в один инструментальный блок.

Таблица 1

Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние типов инструментов в инструментальном блоке.

№	Инструмент	1	2	3	4
1	Сверло	1	1,07	1,07	0,7
2	Зенкер	0,93	1	1	0,65
3	Зенковка	0,93	1	1	0,65
4	Цековка	1,4	1,45	1,45	1

Допустимое осевое усилие, которое приходится на j_k-ый инструмент, для конкретного силового агрегата определяется как

$$[P_{ocjk}] = \frac{[P_{доп_m}]}{\sum_{j_k=1}^{J_k} \sigma_{jk}} \sigma_{jk} \quad . \qquad (6)$$

В этом случае может возникнуть ситуация, когда $[P_{ocjk}] > P_{ocjk}$, что указывает на целесообразность более интенсивной подачи рассматриваемого инстру-

мента. Однако, исходя из принципа назначения для каждого инструмента максимально допустимой подачи, такая интенсификация невозможна и, следовательно, принимается $[P_{ocjk}] = P_{ocjk}$. Тогда, новое откорректированное по допустимому осевому усилию значение подачи инструмента

$$S_{новjk} = S_{jk}\left(\frac{[P_{ocjk}]}{P_{ocjk}}\right)^{\frac{1}{y_{jk}}}, \quad (7)$$

где y_{jk} – коэффициент, учитывающий значение подачи при расчете осевого усилия при обработке концевым инструментом.

При этом должно выполняться условие

$$S_{новjk} \geq min\{[S_{техjk}]\}, \forall\, j_k \in J_k. \quad (8)$$

В противном случае

$$S_{новjk} = min\{[S_{техjk}]\}, \quad (9)$$

что практически не встречается.

Помимо ограничения на допускаемое осевое усилие по использованию силового агрегата для реализации технологической компоновки инструментального блока необходимо рассматривать и другие ограничивающие факторы. В качестве ограничения на применение силового узла используется также возможность реализации типа циклограммы движения инструмента или блока, число инструментов в блоке и, в конечном итоге, требования заказчика. Для силовых столов характерно применение бабок иди коробок соответствующего типоразмера, у которых параметрический ряд допустимых нагрузок соответствует аналогичному ряду силовых столов, что позволяет выбирать (предварительно) и унифицированный узел технологического оснащения.

Изложенный выше подход выбора силовых узлов для реализации технологической компоновки инструментального блока ориентирован на реализацию в системе автоматизированного проектирования и может быть представлен в виде укрупненного алгоритма, состоящего из следующих этапов.

Первоначально (предпочтительнее в диалоговом режиме), в зависимости от конструкторских ограничений по используемому классу силового узла АО (табл. 2), устанавливается признак допустимости к дальнейшему рассмотрению того или иного типа силовых узлов.

Таблица 2

Классификация возможности использования силовых агрегатов при реализации технологической компоновки инструментального блока.

Тип силового агрегата	Код
Все типы агрегатов	0
Только механические	1
Только гидравлические	2
Только силовые головки	3
Только электромеханические столы	4
Силовые столы без уточнения	5

Возможность применения различных методов подбора силовых агрегатов для реализации технологической компоновки инструментального блока, обеспечивающих выполнение условия (1) приведена в таблице 3.

Таблица 3

Методы оптимизации суммарной нагрузки инструментального блока по допустимым значениям силового агрегата.

Признак	Код
П1	Переход к следующему типоразмеру
П2	Оптимизация геометрии инструмента
П3	Реализация последовательной обработки
П4	Корректировка подачи инструмента
П5	Изменение технологической компоновки

Признаки П1-П5 принимают два значения: 0 – если реализация соответствующего метода невозможна, 1 - реализация возможна.

Последовательность рассмотрения силовых узлов, способных обеспечить нормальную работу инструментального блока с учетом всех указанный ограничений, осуществляется по принципу наиболее целесообразного использования узлов минимальных габаритов и стоимости (при выполнении ограничивающих факторов).

При невыполнении условий (1) или (3) выбора силового агрегата к рассмотрению принимаются комбинации указанных выше методов, естественно при возможности их технической реализации (табл. 4).

Таблица 4

Методы оптимизации суммарной нагрузки инструментального блока по коэффициенту использования силового агрегата по осевой нагрузке.

Диапазон		Комбинация методов в порядке предпочтительности
от	до	
1,0	1,12	П1; П2; П3
1,12	1,26	П1; П2; П4; П3
1,26	1,57	П1; П3; П2&П4; П4
1,57	2	П3; П1&П2; П1&П4; П5
2	2,5	П3&П2; П3&П1; П3&П4; П1&П4; П5
2,5	4,0	П3&П1&П4; П5
4,0	6,3	П5

После выполнения соответствующих предложенному методу операций и изменения характеристик инструментального блока, осуществляется повторная проверка. Признаки методов П2 и П3, если они использовались, автоматически помечаются, как невыполнимые при дальнейших расчетах в том случае, когда условие не выполняется повторно. Однако такие случаи в нашей практике не встречались. Выполнение условия (1) означает, что рассматриваемый силовой узел удовлетворяет нас по прочностным характеристикам, и все его параметры используются при дальнейшем проектировании.

В тех случаях, когда выполнение условия (1) возможно только за счет изменения технологической компоновки, данный вариант отклоняется и рассматривается следующий по предпочтительности с другой структурой инструментального блока.

Для одношпиндельной обработки выбранный силовой узел проверяется по условию обеспечения необходимой мощности резания (с учетом к.п.д,) и допускаемого крутящего момента. При многошпиндельной обработке такая проверка нецелесообразна, так как нагрузочные характеристики на ведущем валу зависят от конструкции и передаточного отношения многошпиндельной насадки или коробки.

Проверка силовых узлов по величине хода и определение основных настроечных размеров инструментального блока. Выбранные по критерию допускаемого усилия силовые узлы необходимо, независимо от числа шпинделей в инструментальном блоке, проверить на возможность обеспечения общей длины хода блока. Общая величина хода блока включает в себя длину рабочего хода, величину быстрого подвода-отвода в исходное положение (для поворота делительного стола или снятия детали) и дополнительного отвода силового узла для смены инструмента. Минимальная величина хода, необходимая для обеспечения нормальной работы инструментального блока, определяется величиной заделки патрона в шпинделе, размерами зоны обработки и направления инструмента. На АО широкое распространение получили все основные схемы направления инструмента используемые в машиностроении: непосредственно по профилю режущей части в кондукторных втулках (заднее направление), по дополнительному участку режущего инструмента в кондукторной втулке ила по полученной ранее соосной поверхности меньшего диаметра («переднее» направление). Конструкция и параметры патронов, применяемых для данного класса оборудования, унифицированы для различного типа инструментов. Причем крепление режущего инструмента с коническим хвостовиком осуществляется непосредственно в патроне, а с цилиндрическим хвостовиком (сверла, зенкеры, развертка и др.) - при помощи унифицированных цанг, закрепляемых в патроне или специализированных быстросменных патронов.

Анализ размерной цепи при установке инструмента для различных схем обработки позволил разработать последовательность предварительного выбора стандартного инструмента и определения длин участков резания оригинального инструмента, определения параметров патрона и, следовательно, его исполнения, а также максимально возможной длины регулирования вылета инструмента при его переточке. Каждый шаг данной последовательности направлен на получение параметров конкретного типа инструмента и патрона.

Рассмотрим последовательность осуществления проверки выбранного силового агрегата с точки зрения возможности использования в случае концевой обработки сверлами, зенкерами, развертками и другим аналогичным инструментом.

Первоначально, исходя из возможности применения того или иного типоразмера инструмента, определяется способ его крепления (патрон или цанга). Для инструмента с цилиндрическим хвостовиком выбирается цанга и номер конуса Морзе патрона, в котором цанга будет закреплена, а для инструментов с коническим хвостовиком - непосредственно номер конуса Морзе патрона. Рассчитывается минимально необходимая длина режущей части инструмента и по ней выбирается стандартный инструмент с учетом возможности применения того или иного стандарта. Для оригинального инструмента рассчитывается его минимальная длина по длине режущей части, длине хвостовика и технологическому размеру, которая в дальнейших расчетах используется, как длина инструмента, однако при его окончательном проектировании может быть изменена в определенных пределах с учетом выбранного вспомогательного инструмента (патрона). Далее для инструмента, имеющего максимальную длину, выбирается патрон (по конусу Морзе инструмента), имеющий минимальную величину вылета от торца шпинделя, и рассчитывается основной настроечный размер инструментального блока. Полученный основной настроечный размер позволит определить по расчетному значению вылета патрона от торца шпинделя исполнение патрона и, следовательно, все необходимые для дальнейшего расчета параметры.

На основании полученного значения минимально необходимой величины быстрого отвода и общего хода проверяется возможность использования агрегата, выбранного в соответствии с таблицей 2 типа силового агрегата, соответствующего условиям допустимых силовых нагрузок для рассматриваемого инструментального блока.

$$L_{xk} < [L_x]_k \,, \quad (10)$$

где L_{xk} - расчетная величина хода *k*-го инструментального блока с учетом величины рабочего хода и быстрого отвода, мм;

$[L_x]_k$ - допустимая величина хода *k*-го силового агрегата, мм.

Если условие не выполняется, выбранный силовой узел не может обеспечить нормальную работу рассматриваемого инструментального блоками необходимо выбрать силовой узел, обеспечивающий условие (10). В противном случае данный вариант технологической компоновки инструментального блока отклоняется и к рассмотрению принимается следующий из наиболее перспективных вариантов, у которого инструменты, имеющие максимальную и минимальную длины рабочих ходов, разнесены в разные инструментальные блоки.

Очевидно, что данный расчет настроечных размеров является предварительным, так как на ранних стадиях проектирования нет детальной проработки приспособления и других узлов, и размеры, связанные с этими элементами, рекомендуются на основании статистического анализа соответствующих конструкций уже выпущенного оборудования. Это неизбежно ведет к уточнению и изменению некоторых параметров на последующих стадиях проектирования, однако такая предварительная оценка необходима, чтобы отбросить заведомо нереализуемые варианты.

Выводы. На основе анализа технологических компоновок инструментальных блоков, геометрических параметров инструментов и структурно параметрических характеристик силовых агрегатов предложена машинно-ориентированная методика выбора

силовых агрегатов, способных реализовать технологическую компоновку и параметрические характеристики инструментального блока, которая основана на минимизации стоимости силовых узлов и соответствии их всем ограничениям, связанным как с эксплуатационными, так и организационными факторами. Установлены основные закономерности, позволяющие снижать за счет уменьшения подачи инструментального блока суммарные нагрузки инструментального блока при обработке однотипными инструментами и инструментами различного класса с минимальной потерей производительности рассматриваемого блока. Разработана методика предварительного определения основных настроечных размеров инструментов, образующих инструментальный блок, и параметров инструментов, необходимых для расчета критерия оптимальности. Уточнение всех настроечных параметров осуществляется в процессе разработки конструкторской компоновки.

Это позволило создать основы для направленного структурно-параметрического синтеза рационального варианта общей технологической компоновки АО, учитывающего как структурные, так и параметрические характеристики, и возможности их оптимизации в каждом конкретном случае для всех инструментальных блоков. Данная методика может быть использована как при проектировании нового оборудования, так и при модернизации ранее выпущенных станков.

Список літератури

1. *Фролов К.В.* Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. Том IV-7. М.: Машиностроение, 2002. - 864с.
2. Автоматизированное проектирование оптимальных наладок металлорежущих станков. / *А.М. Гильман, Г.В. Гостев, Ю.Б. Егоров и др.* М.: Машиностроение, 1984. - 168с.
3. *Яковенко И.Э., Яковенко Е.И.* Синтез структур многоинструментальных блоков при обработке концевым инструментом. // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». - Харьков: НТУ “ХПИ”. - 2010. - Вып.40. - С.252-257.
4. *Тимофеев Ю.В., Пермяков А.А., Приходько О.Ю., Яковенко И.Э.* Принципы оптимизации компоновок агрегатных станков. //Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 1997. - С.351-354.

Bibliography (transliterated)

1. Frolov K.V. *Mashinostroenie. Entsiklopediya v soroka tomah*. [Mechanical engineering. Encyclopedia]. Tom IV-7. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 864p.
2. *Avtomatizirovannoe proektirovanie optimalnyih naladok metallorezhuschih stankov.* [Automated design of optimal settings for metal cutting machines]. A.M. Gilman, G.V. Gostev, Yu.B. Egorov i dr. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 168p.
3. Yakovenko I.E., Yakovenko E.I. *Sintez struktur mnogoinstrumentalnyih blokov pri obrabotke kontsevyim instrumentom.* [Synthesis of structures of multi-tool blocks during processing with a tool end]. Vestnik natsionalnogo tehnicheskogo universiteta «Harkovskiy politehnicheskiy institut». – Kharkov, NTU “HPI” Publ. - 2010. - Vyip.40. - P.252-257.
4. Timofeev Yu.V., Permyakov A.A., Prihodko O.Yu., Yakovenko I.E. *Printsipyi optimizatsii komponovok agregatnyih stankov*. [Principles of optimization of assemblies of aggregate machines]. Informatsionnyie tehnologii: nauka, tehnika, tehnologiya, obrazovanie, zdorove. Sbornik nauchnyih trudov HGPU. – Kharkov, HGPU Publ. - 1997. - P.351-354.

Поступила (received) 05.06.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Ранжування технологічних компонувань агрегатованого обладнання на базі инструментальних блоків / І. Е. Яковенко, О. А Пермяков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 99–104. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Ранжирование технологических компоновок агрегатированного оборудования на базе инструментальных блоков / И.Э. Яковенко, О.А. Пермяков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 99–104. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

Ranking of technological layouts of the aggregated equipment on the basis of tool blocks / I. Yakovenko, A. Permyakov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.99–104. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Яковенко Ігор Едуардович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «ХПІ», Харків; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com;

Яковенко Игорь Эдуардович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и металлорежущие станки» НТУ «ХПИ», Харьков; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com;

Yakovenko Igor Eduardovich. - Candidate of Technical Sciences, PhD, Associate Professor of the Department "Technology of mechanical engineering and metal-cutting machines" NTU "KhPI", Kharkiv; tel.: (057) 720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com;

Пермяков Олександр Анатольович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «ХПІ», Харків; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: perm_a@i.ua;

Пермяков Александр Анатольович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и металлорежущих станков» НТУ «ХПИ», Харьков; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: perm_a@i.ua;

Permyakov Alexandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, Full PhD, Professor, Head of the Department "Technology of mechanical engineering and metal-cutting machines" NTU "KhPI", Kharkiv; tel.: (057) 720-66-25; e-mail: perm_a@i.ua.

УДК 621.9-1/-9

В.О. ІВАНОВ, І.М. ДЕГТЯРЬОВ, І.Е. ЯКОВЕНКО

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ ВАЖЕЛІВ

У статті виконано експериментальні дослідження запропонованої конструкції верстатного пристрою, який забезпечує достатню інструментальну доступність і дозволяє виконувати багатокоординатну обробку деталей типу важелів при одному закріпленні. Експериментальні дослідження порівняно із раніше отриманими результатами чисельного моделювання, підтвердили, що запропонована конструкція відповідає усім параметрам точності. Результати експериментальних досліджень із визначення переміщень показали, що величини переміщень, визначені статично, у запропонованому верстатному пристрої менші, ніж у стандартних. Проведений аналіз результатів визначення частот власних коливань при обробці важелів зі сталі та чавуну підтвердив, що перша критична частота запропонованого верстатного пристрою значно перевищує аналогічний параметр стандартних верстатних пристроїв.

Ключові слова: верстатний пристрій, технологічний процес, фрезерування, точність, гнучкість, частота, статичне навантаження.

В статье выполнены экспериментальные исследования предложенной конструкции станочного приспособления, обеспечивающего достаточную инструментальную доступность и позволяющего выполнять многокоординатную обработку деталей типа рычагов при одном закреплении. Экспериментальные исследования по сравнению с ранее полученными результатами численного моделирования, подтвердили, что предложенная конструкция соответствует всем параметрам точности. Результаты экспериментальных исследований по определению перемещений показали, что величины перемещений, определенные статически, в предложенном станочном приспособлении меньше, чем у стандартных. Проведенный анализ результатов определения частот собственных колебаний при обработке рычагов из стали и чугуна подтвердил, что первая критическая частота предложенного станочного приспособления значительно превышает аналогичный параметр стандартных станочных приспособлений.

Ключевые слова: станочное приспособление, технологический процесс, фрезерование, точность, гибкость, частота, статическая нагрузка.

This paper demonstrates the experimental results of proposed fixture which provides the sufficient tool accessibility and allows to realize multiaxis machining the lever-type parts in one setup. The results of experimental researchers were compared with numerical simulation results. The proposed fixture configuration has necessary accuracy parameters. Results of deflected mode research show that the values of displacements and stress during machining in the proposed fixture are smaller than standard one. Modal analysis confirmed that proposed fixture has higher dynamic stiffness than standard fixtures for machining of levers. Simulations were carried out for levers machining of steel and cast iron.

Keywords: fixture, manufacturing process, milling, accuracy, flexibility, frequency, static load.

Вступ. Важливу роль у забезпеченні випуску конкурентоспроможної продукції відіграють верстатні пристрої (ВП). Це підтверджується тим, що вони складають 70–80% від загального обсягу технологічної оснастки [1], 80–90% витрат на технологічну підготовку виробництва витрачається на проектування та виготовлення ВП [2], 10–20% загальної вартості виробничих систем становить вартість ВП [3], до 40% бракованих деталей у машинобудуванні виникає через недосконалість ВП [4].

Постановка проблеми. Сучасне машинобудування характеризується багатономенклатурністю деталей, що випускаються. Збільшення номенклатури виробів потребує ускладнення проектно-конструкторських робіт із виготовлення технологічної оснастки, особливо ВП. Такі умови виробництва вимагають частих переналагоджень на обробку іншої партії деталей, що ставить питання про економічну доцільність проектування та виготовлення спеціальних ВП для деталей конкретного типорозміру. Тому актуальним є впровадження гнучких ВП, які забезпечують переналагодження на інший типорозмір деталей [5].

Аналіз останніх досліджень і літератури. Сучасна тенденція реалізації механічної обробки – висока інтенсифікація технологічних процесів (ТП), тобто скорочення витрат штучного часу за рахунок зменшення частки допоміжного часу, що в умовах жорсткої конкуренції на ринку, багатономенклатурності деталей машинобудування та можливостей сучасних металорізальних верстатів – є актуальною задачею на сьогодні [6]. Одним із основних рішень щодо підвищення інтенсифікації механічної обробки є розроблення та впровадження прогресивних ВП, які мають високий ступінь гнучкості, дозволяють виконувати механічну обробку за мінімальну кількість установлень за рахунок підвищення інструментальної доступності та забезпечення багатокоординатної обробки. Прагнення до обробки деталі за одне установлення є особливо актуальним для верстатів свердлильно-фрезерно-розточувальної групи, адже на них обробляються різні деталі складної просторової конфігурації із взаємним розташуванням поверхонь під різними кутами з малими допусками взаємного розташування. Це, як правило, потребує великої кількості установлень та частих змін схем базування, що безпосередньо впливає на точність виготовлення кінцевого продукту.

На вищевказаних верстатах, як правило, обробляються деталі типу корпусів, блоків циліндрів, планок, шатунів, кронштейнів, важелів тощо. Також виконується фрезерування шпонкових пазів і лисок на валах, свердління радіально-розташованих отворів у фланцях і дисках та отворів, розташованих під кутом.

Підвищення гнучкості та розширення технологічних можливостей ВП, скорочення підготовчо-заключного часу на їх переналагодження, а, отже, підвищення ефективності використання металорізальних верстатів забезпечується за рахунок розроблення та впровадження швидкопереналагоджуваних базуючих модулів, які входять до комплекту універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв [7, 8].

Розроблені конструкторські рішення для базування корпусних деталей за площиною [9–12], площиною та двома отворами [13, 14], у координатний

© В.О. Іванов, І.М. Дегтярьов, І.Е. Яковенко, 2017

кут [15], а також деталей типу тіл обертання з базуванням за зовнішніми циліндричними поверхнями [16–21] та внутрішніми циліндричними поверхнями [21–23] показали високу ефективність в умовах сучасного машинобудування.

Проте у машинобудуванні, зокрема в автомобільній промисловості, досить розповсюдженим є клас деталей складної форми, до якого належать важелі, кронштейни, вилки, шатуни, кулісні, тягові та інші деталі, які входять до класу 74 згідно ЄСКД 1.79.100 ОК 012-93 [24]. Для деталей типу важелів розроблено конструкцію ВП, що дозволяє на сучасному обладнанні забезпечити багатокоординатну обробку та інтенсифікувати ТП їх виготовлення [25].

У даний час обробка деталей складної форми виконується із застосуванням спеціальних або універсально-збірних ВП, які або виключають можливість переналагодження, або дозволяють виконувати його в малому діапазоні розмірів [26].

Виконані дослідження напружено-деформованого стану та модальний аналіз запропонованого ВП [27, 28] дозволяють говорити про те, що даний ВП може бути застосований у реальних виробничих умовах, проте це потребує експериментальної перевірки величини реальних переміщень під дією прикладених сил, а також визначення реальних значень власних частот коливань.

Метою даної роботи є перевірка можливості застосування запропонованого ВП, який забезпечує можливість переналагодження елементів ВП для встановлення деталей типу важелів у певному діапазоні розмірів, підвищує інструментальну доступність та дозволяє виконувати багатокоординатну обробку шляхом експериментальної перевірки та співставлення експериментальних значень величин переміщень та частот власних коливань із результатами моделювання.

Матеріали досліджень. Об'єктом дослідження обрано деталі типу важелів, які є складовими багатьох агрегатів і вузлів машинобудівної продукції, особливо в автомобільній промисловості. Предметом дослідження є запропонований ВП для обробки деталей типу важелів (рис. 1). Даний ВП призначений для встановлення важелів різних типорозмірів у межах технічної характеристики, та дозволяє скоротити витрати часу на переналагодження та забезпечити інструментальну доступність оброблюваних поверхонь [25].

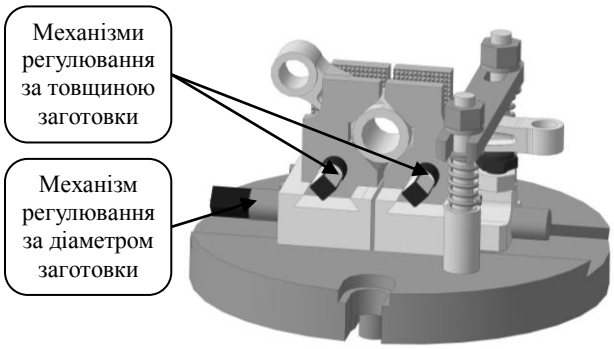
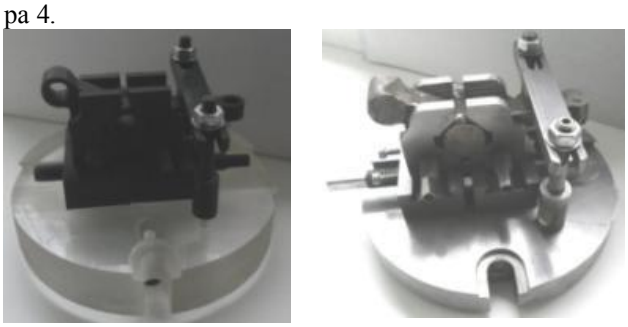


Рис. 1 – Переналагоджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів

Для перевірки можливості складання та функціонування ВП виготовлена модель із ABS-пластику із застосуванням адитивних технологій (рис. 2 а), на основі тестування якої підтверджено її працездатність, та виготовлено дослідний зразок ВП із металу (рис. 2 б). Усі розміри елементів ВП були отримані в результаті параметричної оптимізації.

Також для проведення експериментальної частини досліджень розроблено та виготовлено ВП спеціальної конструкції (рис. 3), який складається з плити 1, оправки 2, що відповідає номінальному розміру отвору центральної бобишки важеля, двох опор 3, та упора 4.



а б

Рис. 2 – Запропонований ВП для обробки важелів:
а - функціональна модель; б – дослідний зразок

Рис. 3 – Дослідний зразок спеціального ВП для обробки деталей типу важелів

Для перевірки адекватності результатів моделювання, шляхом співставлення їх з результатами натурних експериментів виконано експериментальні дослідження НДС запропонованого та спеціального ВП типового ТП.

Експериментальні дослідження НДС ВП передбачає прикладання навантажень до місць оброблюваних поверхонь деталі та вимірювання величини переміщень у точці прикладання навантаження. Для цього на базі матеріально-технічного забезпечення кафедри розроблено експериментальну установку з вимірювання величини переміщень під дією навантаження. Принципова схема вимірювання сил та переміщень представлена на рис. 4, а схеми вимірювання переміщень у вертикальній та горизонтальній площинах на рис. 5 та рис. 6 відповідно.

Відповідно до схем вимірювання переміщень за базову частину експериментальної установки використано горизонтально-фрезерний верстат моделі 6Р83 та вертикально фрезерний верстат моделі 6Р12. На експериментальних установках (рис. 5, рис. 6) закріплення ВП 1 на столі верстата 5 виконувалось за допомогою кріпильних елементів 4. Сили прикладались

через оправку 6, встановлену у шпинделі верстата, що під час переміщення стола діє на тарований динамометр 3 моделі Mohr & FEDERHAFF MANNHEIM. Динамометр представляє собою таровану пружинну скобу, жорсткість якої відома. Величина сили вимірюється за допомогою визначення величини деформації пружинної скоби, що фіксується індикатором годинникового типу моделі МІГ1 ГОСТ 9696-82. Ціна поділки індикатора 0,001 мм відповідає величині сили 6 Н.

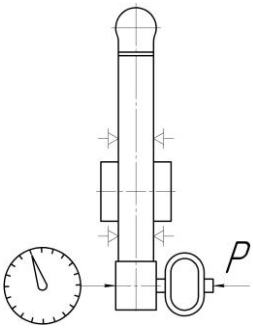


Рис. 4 – Принципова схема дослідження напружено-деформованого стану

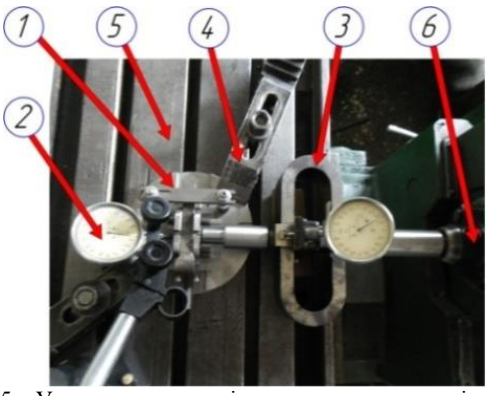


Рис. 5 – Установка для вимірювання сил та переміщень у горизонтальній площині

Рис. 6 – Установка для вимірювання сил та переміщень у вертикальній площині

Вимірювання величини переміщень елементів ВП здійснювалось за допомогою індикатора 2 моделі МІГ1 ГОСТ 9696-82. Розрахункові величини навантажень були взяті для обробки важеля зі сталі 40ХН ГОСТ 4543-71, як найбільші, що можуть зустрітись при обробці. При обробці чавуна СЧ20 та алюмінієвого сплаву АС9 навантаження, що виникатимуть при обробці, будуть суттєво меншими у силу фізико-механічних властивостей даних матеріалів, тому і перевірка НДС для даних умов не виконувалась.

Навантаження на оброблювані поверхні важеля у ВП виконувалось у кількості 10 разів на кожну з поверхонь. При цьому у проміжки між навантаженнями відбувалось повне розвантаження, що імітує процес установлення іншої заготовки. У якості заготовок дослідного зразка для виконання натурного експерименту вкористовувалися виливки з чавуну СЧ20 ГОСТ 1412-85. Процес навантаження, що імітує свердління допоміжних отворів бобишок важеля супроводжується консольними навантаженнями (рис. 7), що може призвести до перевищення допустимої величини напружень для чавуна при прикладенні сил, що виникають при обробці сталі 40ХН. Тому величини навантажень для цих переходів обробки були взяті, як розрахункові для чавуна.

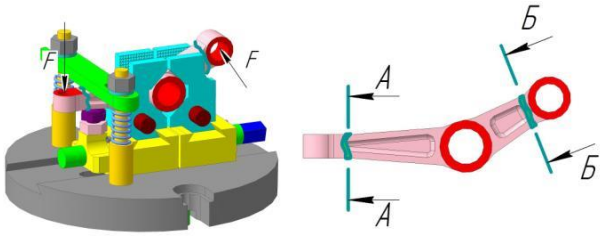


Рис. 7 – Небезпечні перетини у конструкціях важелів при встановленні у ВП

Результати досліджень.

Співставлення експериментальних даних та результатів моделювання для запропонованого та спеціального ВП на найбільш навантажених переходах представлені на графіках (рис. 8–10).

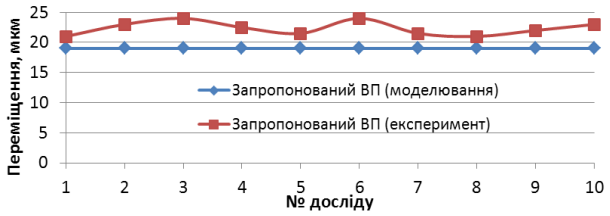


Рис. 8 – Співставлення результатів моделювання та експериментальних даних при свердлінні головного отвору у запропонованому ВП (Po = 5500 Н)

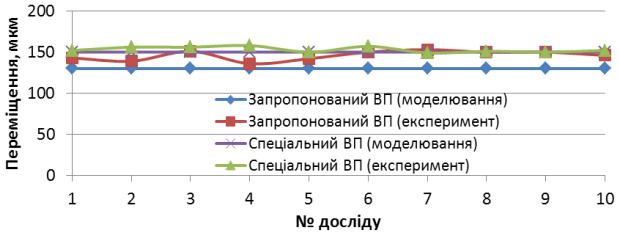


Рис. 9 – Співставлення результатів моделювання та експериментальних даних при свердлінні бобишки допоміжного отвору, що паралельний головному у запропонованому та спеціальному ВП (Po = 3300 Н)

Результати статичного експерименту НДС показали, що величини переміщень елементів ВП більші у середньому на 15% ніж значення величин на аналогічних переходах при моделюванні, проте все одно знаходяться в допустимих межах.

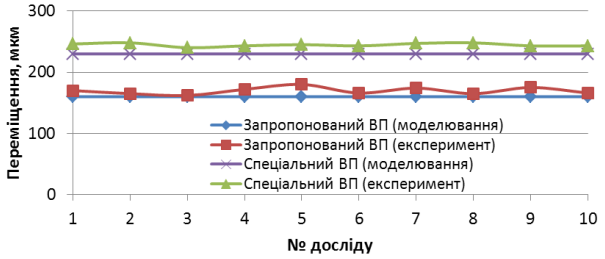


Рис. 10 – Співставлення результатів моделювання та експериментальних даних при свердлінні бобишки допоміжного отвору, що перпендикулярний головному у запропонованому та спеціальному ВП (Po = 2400 Н)

Наявність розбіжності між результатами можна пояснити похибками вимірювання величини сили та переміщень, а також реальними властивостями матеріалу деталей ВП, що можуть відрізнятись від довідникових у допустимих межах. При цьому аналогічна ситуація спостерігається і для спеціального ВП типового ТП. Варто відмітити, що похибка зростає з підвищенням навантаження на елементи як у запропонованому ВП, так і у спеціальному ВП. Отже, виходячи з вищесказаного можна стверджувати, що моделі та граничні умови були задані вірно, тому є сенс провести натурні експерименти із визначення частот власних коливань ВП [29].

Як відомо, процеси механічної обробки дуже часто супроводжуються коливаннями, тому важливо визначити та попередити можливу їх появу. Це можна виконати, якщо знати частоти власних коливань системи. Кожна система має нескінченну множину частот власних коливань та їх форм (мод), але, як правило, у більшості випадків для конструкцій загального машинобудування та ВП зокрема необхідно знати три перші частоти. Форми коливань можуть мати або не мати періодичності, проте кожна неперіодична форма може бути розкладена на безліч періодичних. Коливання характеризуються частотою та періодом, але з точки зору забезпечення працездатності конструкції та попередження появи резонансу необхідно знати саме частоти власних коливань досліджуваної конструкції. У [27] визначені частоти власних коливань та порівняні з частотою процесу різання, але для впевненості необхідно провести експериментальні дослідження по визначенню частоти власних коливань для запропонованого та спеціального ВП та порівняти їх з результатами моделювання.

Експериментальний модальний аналіз ВП для прогресивного та типового ТП виконувався за схемою установлення (рис. 11).

Для експериментального визначення власних частот коливань використано обладнання фірми National Instruments. Обидві установки містять конструкцію ВП (запропонованого або спеціального) 1, що встановлена на столі верстата 2 та закріплена гайками 3, а також пристрою для реєстрації частот коливань 4 за допомогою датчиків 5. ВП жорстко закріплювались на столі верстата задля уникнення побічних коливань, що можуть бути зафіксовані датчиками та внести похибку при експерименті. Масивна конструкція станини верстата буде гасити можливі зовнішні коливання. Для збудження коливань у системі «ВП – заготовка» використовується спеціальний молоток 6 із гумовим наконечником.

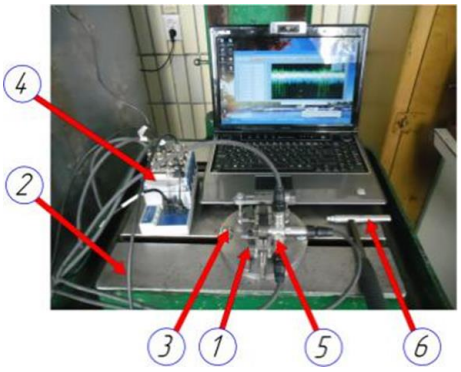


Рис. 11 – Експериментальна установка для виконання модального аналізу

Для збудження коливань у системі «ВП – заготовка» використовується спеціальний молоток 6 із гумовим наконечником. Початковий імпульс надавався шляхом удару молотком по консольним елементам системи «ВП – заготовка» (бобишки головного та допоміжного отворів).

У результаті експериментів отримані миттєві значення віброприскорень, що зафіксовані датчиками через визначені проміжки часу (0,001 секунди). Тому для визначення експериментальних частот власних коливань ВП необхідно визначити спектри частот власних коливань, що можна здійснити за допомогою розкладення отриманих експериментальних значень віброприскорень у вібропереміщення. Ця процедура можлива шляхом подвійного інтегрування функції віброприскорення у вібропереміщення за допомогою використання методу «швидкого перетворення Фур'є». Таким чином, виконавши подвійне інтегрування за допомогою програмного продукту MathCAD отримані спектри частот власних коливань, що для наочності наведено у вигляді графіка (рис. 12), де піки відповідають критичним частотам.

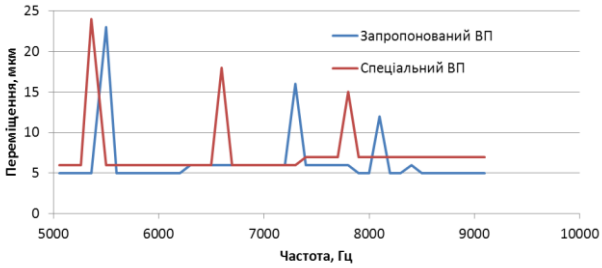


Рис. 12 – Спектри частот власних коливань ВП

Аналізуючи графік, можна зробити висновок, що критичні частоти для запропонованої конструкції ВП вище, ніж для спеціального ВП, а отже, жорсткість запропонованого ВП очікувано буде вищою. Явище резонансу при обробці важеля в обох конструкціях не виникне, адже максимальна частота процесу різання не досягає першої критичної частоти ВП. У результаті експериментів визначені перші критичні величини частот власних коливань: запропонованого ВП – 5516 Гц; спеціального ВП – 5417 Гц. Співставлення теоретичних та експериментальних досліджень власних частот коливань ВП наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Співставлення результатів теоретичних та експериментальних досліджень власних частот коливань ВП

Верстатний пристрій	Критичні частоти, Гц (результати моделювання)			Критичні частоти, Гц (результати експерименту)			Похибка, %		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Спеціальний	5888	7268	8250	5417	6578	7766	9	9,5	5,9
Запропонований	5970	7830	8915	5516	7290	8250	7,6	6,9	9,2

Висновки.

Доведено, що розроблені технічні рішення сприяють інтенсифікації ТП механічної обробки та не призводять до погіршення показників точності. Проведені експериментальні дослідження НДС показали, що розроблена конструкція ВП для обробки важелів забезпечує багатокоординатну обробку та відповідає умовам міцності, а також значно скорочує витрати допоміжного та підготовчо-заключного часу.

Експериментальні дослідження НДС системи «ВП – заготовка» які показали, що величини переміщень елементів ВП більші у середньому на 15% ніж значення величин на аналогічних переходах при моделюванні. Проте значення реальних переміщень також не виходять за величину допусків, що задані на кресленні.

Експериментальні дослідження частот власних коливань системи «ВП – заготовка» показали зменшення частот власних реальних конструкцій запропонованого та спеціального ВП на 8% порівняно з результатами моделювання. Реальні частоти власних коливань перевищують режими обробки, отже резонанс не виникне.

Подальші дослідження спрямовані на експериментальну перевірку можливості здійснення механічної обробки важеля із заданими точнісними параметрами безпосередньо на верстаті, а також розробку ВП для обробки інших деталей складної форми, використовуючи новий підхід до проектування.

Список літератури:

1. Ряховский А. В. Разработка и внедрение комплекта унифицированной технологической оснастки для обработки корпусных деталей специзделий [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Ряховский Алексей Владимирович. – Харків, 1996. – 135 с.

2. Іванов В.О. Вибір оптимальних компоновок верстатних пристроїв для верстатів з ЧПК [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.02.08 / Іванов Віталій Олександрович. – Харків, 2010. – 239 с.

3. Hashemi H. A case-based reasoning for design of machining fixture [Text] / H. Hashemi, A. M. Shaharoum, I. Sudin // Int Journal of Manufacturing Technology, 2014. – Vol. 74. – P. 113–124.

4. Wang H. Computer aided fixture design: recent research and trends [Text] / H. Wang, Y. Rong, H. Li, P. Shaun // Computer-Aided Design, 2010. – Vol. 42 (12). – P. 1085–1094.

5. Карпусь В. Е. Обоснование выбора системы приспособлений в серийном производстве [Текст] / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Високі технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – Вип. 1 (16). – С. 125–134.

6. Карпусь В. Є. Інтенсифікація процесів механічної обробки [Текст] : монографія / В. Є. Карпусь, В. О. Іванов, О. В. Котляр та ін.; за ред. В. Є. Карпуся. – Суми : Сумський державний університет, 2012 – 436 с.

7. Карпусь В. Е. Универсально-сборные переналаживаемые приспособления [Текст] / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2008. – №11. – С. 46–50.

8. Karpus' V. E. Universal-composite adjustable machine-tool attachments [Text] / V. E. Karpus', V. A. Ivanov // Russian Engineering Research, 2008. – Vol. 28, No. 11. – P. 1077–1083.

9. Пат. на корисну модель № 71870, Україна, МПК (2012) B23 B39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Іванов В. О., Дегтярьов І. М., Кушніров П. В.

10. Пат. на корисну модель № 96399 Україна, МПК (2015) B23B 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Іванов В. О., Дегтярьов І. М.

11. Швидкопереналагоджувані базуючі модулі для встановлення корпусних деталей [Текст] / В. Є. Карпусь, В. О. Іванов, Д. О. Міненко, І. М. Дегтярьов. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. – № 2. – С. 91–94.

12. Пат. на корисну модель № 113147 Україна, МПК (2016) B23B 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Іванов В. О., Дегтярьов І. М., Карпусь В. Є.

13. Пат. на корисну модель № 60130 Україна, МПК (2011) B23B 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Іванов В. О., Карпусь В. Є. **1**

4. Пат. на корисну модель № 67918 Україна, МПК (2012) B23B 39/00, B23B 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Іванов В. О., Карпусь В. Є., Романенко І. В.

15. Пат. на корисну модель № 59745 Україна, МПК (2011) B23B 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Іванов В. О., Карпусь В. Є.

16. Пат. на корисну модель № 31416 Україна, МПК (2006) B23B 39/00. Базуюча призма, що автоматично регулюється [Текст] / Карпусь В. Є., Іванов В. О.

17. Карпусь В. Є. Вибір базуючих модулів для установлення валів при обробці на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах [Текст] / В. Є. Карпусь, В. О. Іванов, К. С. Вараксіна. // Резание и инструмент в технологических системах. – 2009. – № 76. – С. 55–62.

18. Карпусь В. Е. Экспериментальные исследования точности обработки валов при базировании в призмах [Текст] / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов, А. В. Ряховский. // Вісник Сумського державного університету. – 2010. – № 4. – С. 24–27.

19. Карпусь В. Е. Точность базирования валов в призмах [Текст] / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов. // Вестник машиностроения. – 2012. – № 2. – С. 40–45.

20. Karpus V. E. Locating accuracy of shafts in V-blocks [Text] / V. E. Karpus, V. A. Ivanov. // Russian Engineering Research, 2012. – Vol. 32 № 32. – P. 144–150.

21. Пат. на корисну модель № 113148 Україна, МПК (2016.01) B23Q 3/06. Переналагоджуваний самоцентруючих установлювально-затискний модуль [Текст] / Іванов В. О., Дегтярьов І.М., Павленко І. В.

22. Пат. на корисну модель № 30999 Україна, МПК (2006.01) B23Q 3/06. Оправка розтискна [Текст] / Карпусь В. Є., Іванов В. О.

23. Пат. на корисну модель № 95074 Україна, МПК (2014.01) B23B 39/00. Переналагоджуваний базуючий модуль [Текст] / Іванов В. О., Дегтярьов І. М.

24. Іванов В.О. Технологія виготовлення автомобільних деталей складної форми [Текст] / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов, В. Р. Богдан // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – Харків. : Національна академія Національної гвардії України, 2015. – №. 1 (25). – С. 85–90.

25. Пат. на корисну модель № 98925 Україна, МПК (2015.01) B23B 39/00. Переналагоджуваний установлювально-затискний модуль для обробки деталей типу важелів [Текст] / В.О. Іванов, І.М. Дегтярьов, В.Є. Карпусь.

26. Боровік А. І. Технологічна оснастка механоскладального виробництва [Текст] : книга / А. І. Боровік. – К.: Кондор, 2008. – 726 с.

27. Іванов В.О. Чисельне моделювання верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів [Текст] / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов та ін. // Вісник НТУ «ХПІ».– Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4 (1113). – С. 110–115.

28. Ivanov V. Numerical simulation of the system «fixture–workpiece» for lever machining [Text] / V. Ivanov, D. Mital, V. Karpus, I.

Dehtiarov et. al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016, 12 p., doi: 10.1007/s00170-016-9701-2.

29. Іванов В. О. Аналіз експериментальних даних та їх співставлення з результатами моделювання / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов // Машинобудування очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали XVI міжнар. молод. науково-техн. конф., 26–29 жовтня 2016 р., Суми. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – С. 22.с.

Bibliography (transliterated)

1. Rjahovskij A. V. *Razrabotka i vnedrenie komplekta unificiro-vannoj tehnologicheskoj osnastki dlja obrabotki korpusnyh detalej specizdelij*, Harkiv, 1996. Print.

2. Ivanov V.O. *Vy`bir opty`mal`ny`x komponovok verstatnyh pry`stroyiv dlya verstativ z ChPK*, Harkiv, 2010. Print.

3. Hashemi H. A, Shaharoum A. M., Sudin I. C*ase-based reasoning for design of machining fixture*, 2014. Print.

4. Wang H., Rong Y., Li H., Shaun P. *Computer aided fixture design: recent research and trends*, 2010. Print.

5. Karpus` V.E., Ivanov V.A. *Obosnovany`e vibora sy`stemi pry`sposobleny`j v sery`jnom proy`zvodstve* Harkiv. Vy`soki texnologiyi v mashy`nobuduvanni, 2008. Print.

6. Karpus` V.E., Ivanov V.O., Kotlyar O.V. *Intensy`fikaciya procesiv mexanichnoyi obrobky`*. Sumy, 2012. Print**.**

7. Karpus` V.E., Ivanov V.A. *Universal'no-sbornye perenalazhivaemye prisposoblenija*, 2008. Print.

8. Karpus` V.E., Ivanov V.A. *Universal-composite adjustable machine-tool*, 2008. Print.

9. Ivanov V.O., Degtyar`ov I.M., Kushnirov P.V. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2012. Print.

10. Ivanov V.O., Dehtiarov I.M. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2015. Print.

11. Karpus` V.E., Ivanov V.O., Minenko D.O., Degtyar`ov I.M. *Shvy`dkoperenalagodzhuvani bazuyuchi moduli dlya vstanovlennya korpusnyh detalej*, 2012. Print.

12. Ivanov V.O., Dehtiarov I. M., Karpus` V.E. *Pat. na kory`snu model 113147. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2017. Print.

13. Ivanov V.O., Karpus` V.E. *Pat. na kory`snu model 60130. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2011. Print.

14. Ivanov V.O., Karpus` V.E., Romanenko I.V. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2012. Print.

15. Ivanov V.O., Karpus` V.E. *Pat. na kory`snu model 59745. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2011. Print.

16. Ivanov V.O., Karpus` V.E. *Pat. na kory`snu model. Bazuyucha pry`zma, shho avtomaty`chno regulyuyet`sya*, 2006. Print.

17. Karpus` V.E., Ivanov V.O., Varaksina K.S. *Vy`bir bazuyuchyh moduliv dlya ustanovlennya valiv pry` obrobci na sverdly`l`no-frezerno-roztochuval`nyh verstatah*, 2009. Print.

18. Karpus' V.E., Ivanov V.A., Rjahovskij A.V. *Eksperimental'nye issledovanija tochnosti obrabotki valov pri bazirovanii v prizmah*, 2010. Print.

19. Karpus' V.E., Ivanov V.A. *Tochnost' bazirovanija valov v prizmah*, 2012. Print.

20. Karpus V. E., Ivanov V. A. *Locating Accuracy of Shafts in V-blocks*, 2012. Print.

21. Ivanov V.O., Dehtiarov I.M., Pavlenko I. V. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j samocentruuchij ustanovlyuval`no-zaty`skny`j modul`*, 2017. Print.

22. Karpus` V.E., Ivanov V.O. *Pat. na kory`snu model. Opravka rozty`skna*, 2006. Print.

23. Ivanov V.O., Dehtiarov I.M. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j bazuyuchy`j modul`*, 2014. Print.

24. Ivanov V.O., Karpus` V.E., Dehtiarov I.M., Bohdan V. R. *Tehnologia vigotovlennya avtomobilnih detalej skladnoi formi*. Kharkiv. Natsionalna academia Natsionalnoi hvardii Ukrainy, 2015. Print.

25. Ivanov V.O., Dehtiarov I.M., Karpus` V.E. *Pat. na kory`snu model. Perenalagodzhuvany`j ustanovlyuval`no-zaty`skny`j modul` dlya ustanovlennya detalej ty`pu vazheliv*, 2015. Print.

26. Borovik A.I. *Texnologichna osnastka mexanoskladal`nogo vy`robny`cztva*, 2008. Print.

27. Ivanov V.O., Dehtiarov I.M., Karpus` V.E. *Chiselne modeluvannija verstatnich pristroiv dlya mechanichnoi obrobky detalej ty`pu vazheliv*. Kharkiv. NTU KHPI, 2015. Print.

28. Ivanov V., Mital D., Karpus V., Dehtiarov I., et. al. *Numerical simulation of the system «fixture–workpiece» for lever machining* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Print. doi: 10.1007/s00170-016-9701-2.

29. Ivanov V.O., Dehtiarov I.M. *Analys eksperimentalnich dannych ta ih spivstavlennia z rezultatami modeluvannia*, Sumy. SumDU, 2016. Print.

Надійшла (received) 22.07.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експериментальні дослідження верстатних пристроїв

Експериментальні дослідження верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів / В.О. Іванов, І.М. Дегтярьов, І.Е. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 105–111. – Библиогр.: 29 назв. – ISSN 2079-004X.

Экспериментальные исследования станочных приспособлений для механической обработки деталей типа рычагов / В.А. Иванов, И.М. Дегтярев, И.Э. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 105–111. – Библиогр.: 29 назв. – ISSN 2079-004X.

Experimental studies of machine tools for machining parts of the lever type / V. Ivanov, I. Degtyarev, I. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P.105–111. – Bibliogr.: 29. – ISSN 2079-004X

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Іванов Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету, м. Суми; тел.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua;

Иванов Виталий Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов Сумского государственного университета, г. Сумы; тел.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua;

Ivanov Vitalii Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools of Sumy State University, Sumy; tel.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua;

Дегтярьов Іван Михайлович – асистент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету;

Дегтярев Иван Михайлович - ассистент кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов Сумского государственного университет;

Degtyarev Ivan Mikhailovich - assistant of the chair of technology of mechanical engineering, machine tools and tools of Sumy State University;

Яковенко Ігор Едуардович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «ХПІ», Харків; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com;

Яковенко Игорь Эдуардович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и металлорежущие станки» НТУ «ХПИ», Харьков; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com;

Yakovenko Igor Eduardovich. - Candidate of Technical Sciences, PhD, Associate Professor of the Department "Technology of mechanical engineering and metal-cutting machines" NTU "KhPI", Kharkiv; tel.: (057) 720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com.

ЗМІСТ

Сокол Е.И., Ищенко Г.И., Черкасский А.Ю., Ищенко М.Г., Линник А.В. Технологическое обеспечение изготовления гидравлической турбины для Днестровской ГАЭС ……...….5

Костюк Г.И. Создание высокоэнтропийных нитридных нанопокрытий на твёрдом сплаве Т12А……14

Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Антонюк В.С., Волошин О.І. , Рябченко С.В. Технологічні напрямки щодо забезпечення якісного виготовлення крупногоабарітних редукторів……...….19

Равська Н. С., Вовк В. В., Воробйов С. П., Басова Є.В. Визначення геометричних параметрів різців головки при нарізанні точних арочних зубчастих коліс…….31

Добротворский С.С., Алексенко Б.А., Добровольская Л.Г. Совершенствование процесса расчета аэродинамической модели обтекания слоя адсорбента в полости адсорбционной колонны за счет выбора наилучшей модели турбулентности…….39

Гаращенко Я. Н. Оценка технологичности конструкции изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий...……...44

Кленов О.С. Упрощенные подходы к аналитическому определению температуры резания при механической обработке……...…51

Ковалевський С.В., Ковалевська О.С. Концепція діагностики механізму мобільного верстата – робота для створення його еталонної моделі……...…56

Костюк Г. И. , Широкий Ю.В. Перспективы применения лазерной обработки для создания наноструктур на ри из «ВолКар»……...…60

Шелковой А.Н., Клочко А.А., Гасанов М.И., Кравченко Д.А. , Анцыферова О.А. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования……..…66

Костюк Г. И., Воляк Е.А., Евсеенко А.В. Перспективы получения наноструктур на специальном чугуне при действии фемтосекундного лазера……75

Дзержинська О.В., Крупко І.В., Котляр О.В. Вплив форми опорної поверхні лижи на переміщення крокуючого екскаватора……...….81

Роп'як Л.Я. Складальні напруження в робочому колесі відцентрового вентилятора……...86

Ковальов В.Д., Антоненко Я.С., Виганяйло Б.Ю. Натурні випробування крутної жорсткості станин важких токарних верстатів……...…94

Яковенко И.Э., Пермяков О.А. Ранжирование технологических компоновок агрегатированного оборудования на базе инструментальных блоков ……..99

Іванов В.О., Дегтярьов І.М., Яковенко І.Е. Експериментальні дослідження верстатних пристроїв для механічної обробки деталей типу важелів……...105

CONTENTS

Sokol E., Ishchenko G., Cherkasy A., Ishchenko M., Linnik A. Technological support for the manufacture of a hydraulic turbine for the Dniester PSP ……5

Kostyuk G. Creation of highly entropic nitride nanocoats on a solid T12A alloy……..14

Kovalev V., Vasilchenko Ya., Antonyuk V., Voloshin A., Ryabchenko S. Technological directions for providing high-quality production of large-size reducers……..19

Ravskaya N., Vovk V., Vorobiev S., Basova E. Research precision parameters for generating gear grinding bobbin wheel profile of gerotor……..…31

Dobrotvorskyy S., Aleksenko B., Dobrovolska L. Improving the process of calculating the aerodynamic flow around the model of the adsorbent layer in the cavity of the adsorption columns by selecting the best model of turbulence……....39

Garashchenko Ya. Manufacturability evaluation of industrial products manufactured by additive technologies……....44

Klenov O. Simplified approaches to analytical determination of cutting temperature during machining…….51

Kovalevskyy S., Kovalevska E. The concept of diagnostics of the mechanism of a mobile machine-robot for creating its reference model……..56

Kostyuk G., Shirokyy Yu. Prospects of using laser processing to create nanostructures on the Rie from «VolKar»…….60

Shelkovoy A., Klochko A., Gasanov M., Kravchenko D., Antsiferova O. Functional aspects of simulation mathematical modeling of geometric parameters of the process of gear milling…….66

Kostiuk G., Volyak E., Eseenko A. Prospects for obtaining nanostructures on special cast iron under the action of a femtosecond laser……...75

Dzerzhinskaya O., Krupko I., Kotlyar A. Influence of the shape of the reference surface of the ski on the movement of a walking excavator……...81

Ropyak L. Assembly stresses in the impellers of the centrifugal fan……..…86

Kovalev V., Antonenko Y., Viganailo B. Full-scale tests of the stiffening rigidity of heavy-duty lathe lathes ……..94

Yakovenko I., Permyakov A. Ranking of technological layouts of the aggregated equipment on the basis of tool blocks……..99

Ivanov V., Degtyarev I., Yakovenko I. Experimental studies of machine tools for machining parts of the lever type……..105

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

Збірник наукових праць

Серія:
Технології в машинобудуванні

№ 26 (1248) 2017

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. О.А. Пермяков,
д-р техн. наук, проф. О.О. Клочко
Технічні редактори канд. техн. наук, доц. Є.В. Басова,
канд. техн. наук, доц. Іванова М.С.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова,2, НТУ «ХПІ».
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

Обл.-вид № 17–17.

Підп. до друку 19.09.2017 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік. -вид. арк. 10.
Тираж 300 пр. Зам. No 301134. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул Кирпичова, 2

Надруковано в друкарні ФО-П Дуюнова Т.В.
Свідоцтво про державну реєстрацію № 2475418720 від 19.11.2014 р.
61023, Харків, вул. Веснина, 12.
тел. +38 (057) 717-28-80, e-mail: promart_order@ukr.net