

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

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute»

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Технології в
машинобудуванні**

№ 19 (1344) 2019

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
«KhPI». Series: Techniques in
a machine industry**

No. 19 (1344) 2019

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2019

Kharkiv
NTU "KhPI", 2019

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2019. — № 19 (1344) 2019. — 80 с. — ISSN 2079-004X.

Видання присвячене освітленню досягнень в галузі машинобудування. Мета видання полягає у публікації оригінальних досліджень, які теоретично досліджують та вдосконалюють технологічні процеси виготовлення деталей машин і складання виробів, технологічного обладнання та оснащення, із приділенням особливої уваги: методам механічної обробки, їх стабільності і надійності; формуванню точності й якості поверхонь деталей машин; моделюванню, проектуванню й оптимізації технологічних процесів; організаційно-технологічним проблемам гнучкого виробництва; автоматизації операцій механоскладального виробництва; створенню, управлінню та діагностиці технологічних і мехатронних систем; інтегрованим та комп'ютерним технологіям в машинобудуванні; проблемам створення систем підтримки життєвого циклу виробу машинобудування; фізико-механічним та нанотехнологіям в машинобудуванні.

Для науковців та фахівців в галузі технологій машинобудування, викладачів вищої школи, аспірантів і студентів.

This issue is devoted to clarifying achievements in mechanical engineering. The purpose of the edition is publishing original researches which explore theoretically and improve the engineering processes of machines parts manufacturing and products assembly, equipment, jigs and fixtures with paying special attention to stability and reliability of machining methods; assurance of accuracy and quality of surfaces; modeling, design and optimization of machining processes; organizational and technical problems of flexible production; automation of operations of mechanical assembly production; creation, management and diagnostics of technological and mechatronic systems; integrated and computer technologies in engineering; design problems of systems for supporting the life cycle of a machine-building product; physical-mechanical technologies and nanotechnologies in mechanical engineering.

he edition is intended for scientists and specialists of mechanical engineering, lecturers, post-graduate students and students.

Державне видання.

Свідцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні 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»

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://web.kpi.kharkov.ua/tmms/ru/vestnik-ntu-hpi/>

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

Пермяков О.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заступник відповідального редактора:

Клочко О.О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Басова Є.В., к-т техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Антонюк В.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Добротворський С.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Кальченко В.В., д-р техн. наук, проф., ЧНТУ, Україна

Кане М.М., д-р техн. наук, проф., Білоруський НТУ, Білорусь

Ковальов В.Д., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Мироненко Є.В., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Пасічник В.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Сизий Ю.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Сталінський Д.В., д-р техн. наук, проф., ДП УкрНТЦ «ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

Степанов М.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Фадєєв В.А., д-р техн. наук, проф., ПАТ «ФЕД», Україна

Хавін Г.Л., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шелковий О.М., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Editor-in-chief

Sokol Ye. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Secretary

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff

Associate editor:

Permiakov A.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor:

Klochko A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Basova Ye. V. PhD, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Antonyuk V.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Dobrotvorskiy S.S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kalchenko V.V., prof., ChNTU, Ukraine

Kane M.M. , prof., Belarusia NTU, Belarus

Kovalev V.D., prof., DSEA, Ukraine

Mironenko Ye.V., prof., DSEA, Ukraine

Pasichnyk V.A., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Syzyi Yu.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Stalinskyi D.V., prof., Ukraine

Stepanov M.S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Fadiev V.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Khavin G.L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shelkovyi O.M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 7 від 05 липня 2019 р.

Г. И. КОСТЮК, В. В. ПОПОВ, А. В. ЕВСЕЕНКОВА

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ВОЗМОЖНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР В ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ VK10, BK10 МОДИФИЦИРОВАННОГО И BK20

В статье рассмотрены величины температурных напряжений и скорости деформирования для твердых сплавов VK10, BK10 модифицированного и BK20 при действии на них ионов различных сортов (бора, азота, иттрия, гафния), показано, что наибольшие величины температурных напряжений реализуются для VK10, величины же температурных напряжений для модифицированного BK10 существенно меньше на 2–3 порядка, а для BK20 реализуются температурные напряжения незначительно – меньше, чем для VK10 модифицированного, причём в последних двух случаях их величины всегда будут меньше необходимых для образования наноструктур (при действии ионов бора). С ростом массы иона (азот, итрий, гафний) температурные напряжения растут, но не значительно. Показано, что реализуются условия, необходимые для образования наноструктур в основном при энергиях выше 800–1000 кеВ меньшие значения соответствуют большему зарядовому числу ($z = 3$). Скорость же деформирования изменяется от 10^{22} – 10^{25} Па/с, т. е. скорость деформирования практически во всех случаях превышает необходимую для образования наноструктур. Это значит, что при действии ионов определяющим является величина напряжений при образовании наноструктур.

Ключевые слова: температурные напряжения, скорость деформирования, наноструктуры, ионы, заряд, твердый сплав.

Г. І. КОСТЮК, В. В. ПОПОВ, Г. В. ЄВСЄЄНKOBA

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ НАПРУЖЕНЬ І ШВИДКОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ НА МОЖЛИВІСТЬ УТВОРЕННЯ НАНОСТРУКТУР В ТВЕРДИХ СПЛАВАХ VK10, BK10 МОДИФІКОВАНОГО І BK20

У статті розглянуто величини температурних напружень і швидкості деформування для твердих сплавів VK10, BK10 модифікованого і BK20 при дії на них іонів різних сортів (бору, азоту, ітрію, гафнію) показано, що найбільші величини температурних напружень реалізуються для VK10, величини ж температурних напружень для модифікованого BK10 істотно менше на 2–3 порядки, а для BK20 реалізуються температурні напруження незначно – менше ніж для VK10 модифікованого, причому в останніх двох випадках їх величини завжди будуть менше необхідних для утворення наноструктур (при дії іонів бору). З ростом маси іона (азот, ітрій, гафній) температурні напруження зростають, але незначно. Показано, що реалізуються умови, необхідні для утворення наноструктур в основному при енергіях вище 800–1000 кеВ менші значення відповідають більшим зарядовим числам ($z = 3$). Швидкість же деформування змінюється від 10^{22} – 10^{25} Па/с, тобто швидкість деформування в переважній більшості випадків перевищує необхідну для утворення наноструктур. Це означає, що при дії іонів визначальним є величина напружень при утворенні наноструктур.

Ключові слова: температурні напруження, швидкість деформування, наноструктури, іони, заряд, твердий сплав.

G. KOSTYUK, V. POPOV, A. YEVSEYENKOVA

THE EFFECT OF TEMPERATURE STRESS AND STRAIN RATE ON THE POSSIBILITY OF NANOSTRUCTURE FORMATION IN VK10, BK10 MODIFIED AND BK20 HARD ALLOYS

The article considers the values of thermal stresses and deformation rates for hard alloys VK10, VK10 modified and BK20 under the action of ions of various grades (boron, nitrogen, yttrium, hafnium) on them, which shows that the largest values of thermal stresses are realized for VK10, while the values of thermal stresses for modified BK10 is significantly less by 2–3 orders of magnitude; for BK20, thermal stresses are slightly lower than those for BK10 modified, and in the latter two cases their values will always be less necessary for the formation of nanostructures (under the action of boron ions). With an increase in the ion mass (nitrogen, yttrium, hafnium), temperature stresses increase, but not significantly. It is shown that the condition necessary for the formation of nanostructures is realized mainly at energies above 800–1000 keV. Smaller values correspond to large charge numbers ($z = 3$). The speed of deformation varies from 10^{22} – 10^{25} Pa / s, i.e. the deformation rate in almost all cases exceeds that necessary for the formation of nanostructures. This means that under the action of ions, the magnitude of the stresses during the formation of nanostructures is decisive.

Keywords: thermal stresses, strain rate, nanostructures, ions, charge, solid alloy.

Введение. Как известно [1–3], наноструктуры образуются при реализации двухосного деформированного состояния, когда напряжения в направлении обеих осей превышает 10^{10} Па. Как показано в монографиях [4–7] наличие температурных напряжений величиной 10^7 – 10^9 Па может ускорять образование наноструктур при реализации других критериев их образования: наличие температур 500–1500 К и превышение скорости нарастания температур 10^7 К/с, что говорит о важности определения величин температурных напряжений и скорости их роста. Такому исследованию посвящена настоящая статья, а значит, она является актуальной и своевременной.

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 наших работах проводились исследования возможности образования наноструктур в значительном количестве различных твердых сплавов, но для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20 такие исследования небыли проведены и что интересно – модифицирование твердого сплава ВК10 нитридами алюминия, титана и хрома может приводить к существенным изменениям физико-механических характеристик [1–7], а следовательно, и влиять на напряжённое состояние, исследование которого проводилось для всех трёх твердых сплавов. Исследования дадут ответ на возможность образования наноструктур непосредственно за счёт действия температурных напряжений и дадут возможность оценить достаточно ли скорость деформирования для образования наноструктур. В ряде наших работ рассмотрено образование наноструктур в этих сплавах за счёт достижения необходимых температур и скоростей их возрастания [8–14], т. е. наши исследования дадут развитие последним нашим работам и позволят оценить вероятность образования наноструктур за счёт действия температурных напряжений, а также возможность ускорения образования наноструктур за счёт рассмотренных в этих работах эффектов. Всё это говорит о важности проводимых исследований, а значит, и даёт новые представления о возможности образования наноструктур при действии ионов различных энергий и зарядов.

Постановка цели и задач исследования. Исследование проводилось на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия потоков ионов (или лазерного излучения) на твердосплавный и быстрорежущий инструмент [9]. Причём широко варьировались энергии ионов и их сорта, рассматривались одно-, двух- и трехзарядные ионы. Такие расчёты были проведены для твёрдосплавных пластин. Все это позволяет выбирать вид обработки, который обеспечивает достаточные для производства работоспособность и эффективность РИ, а в конечном счёте позволяет создать принципы конструирования РИ с наноструктурами и нанопокрытиями.

Целью работы было выяснение возможности образования наноструктур за счёт действия температурных напряжений и возможности ускорения образования наноструктур в результате других реализаций других критериев образования НС.

Результаты и их обсуждение. Были рассчитаны температурные напряжения и скорости деформирования для случаев действия ионов бора, азота, иттрия и гафния на твердые сплавы ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20, построены зависимости температурных напряжений и скоростей деформирования от энергии ионов бора,

азота, иттрия и гафния с различными зарядами ($z=1$, $z=2$, $z=3$), которые представлены на рис. 1-4.

Видно, что для ионов бора (рис. 1) максимальные значения температурных напряжений реализуются для твёрдого сплава ВК10, где в диапазоне энергий от 150-200 КэВ до 20 КэВ есть реальная возможность образования наноструктур в результате действия температурных напряжений, тогда как при меньших энергиях ионов возможно лишь ускорение процесса образования НС за счёт других критериев.

Для случаев действия иона бора на ВК1 модифицированный и ВК20 реализация наноструктур не реальна, но возможно ускорение получения наноструктур за счёт других критериев.

Скорости деформирования высоки для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20 и достаточны для получения НС, но так как величины температурных напряжений недостаточны, то НС не образуется (рис. 1).

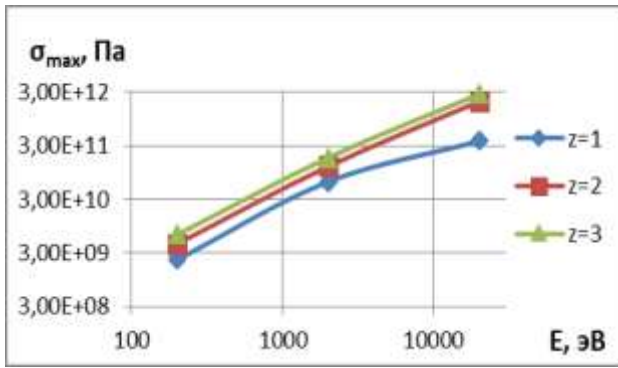
При действии ионов азота зависимость температурных напряжений и скоростей деформирования от энергии ионов азота представлены на Рис. 2 ($z = 1$, $z = 2$, $z = 3$). Видно, что зона образования НС переместилась в зону меньших энергий и НС образуются для ВК10, уже начиная с 300–350 эВ до 20 кэВ, т. е. образование НС затрудняется с ростом массы иона, а зона, где есть возможность ускорения образования не за счёт других критериев, сужается и начинается с 500–1200 эВ для ВК10 модифицированного, а для ВК20 – с 1100–1500 эВ, т. е. ускорение образования НС за счёт действия температурных напряжений маловероятно, скорости деформирования достаточно высоки (рис. 2).

Действие ионов иттрия на твердые сплавы ВК10, ВК10 модифицированный и ВК20 показывает, что энергия ионов для образования НС, хоть и незначительно, но увеличивается до 350–400 эВ, а зона энергий, когда вероятность ускорения образования НС за счёт других критериев смещается в зону больших энергий (1100–1300 эВ) для других твердых сплавов даже зона ускорения образования НС уменьшается и начинает реализовываться с 1200–1600 эВ. Скорость деформирования достаточно для образования НС для всех твёрдых сплавов (рис. 3).

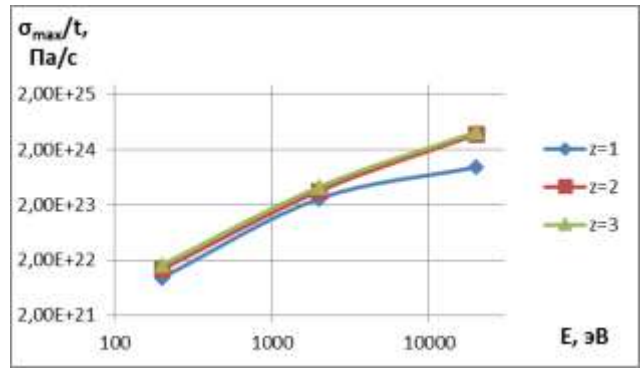
Переход к ионам гафния приводит к практическому сохранению результатов, которые очень близки, что позволяет для ионов с атомными массами более 90 единиц расчётов не проводить, так они имеют отличия в пределах погрешности расчётов (сравни рис. 4 и рис. 3).

Выводы.

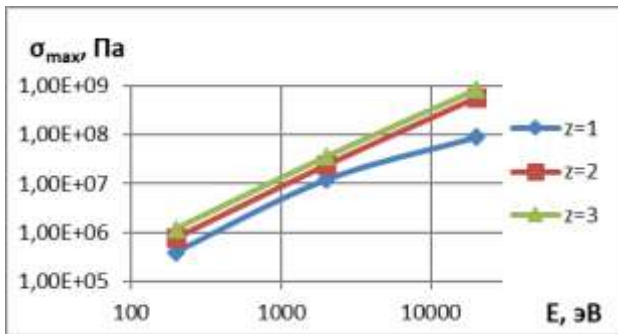
Показано, что для твёрдого сплава ВК10 есть реальная возможность получения наноструктур за счёт действия температурных напряжений и ускорения образования НС за счёт других критериев довольно таки реальна.



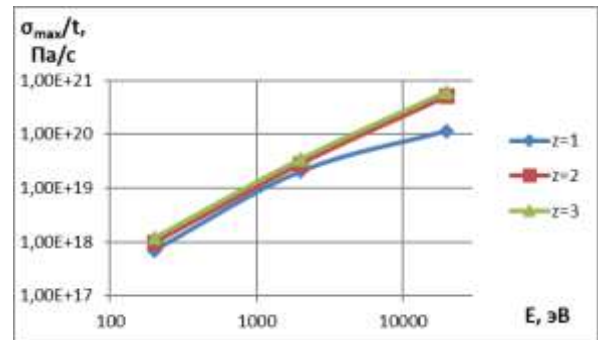
а



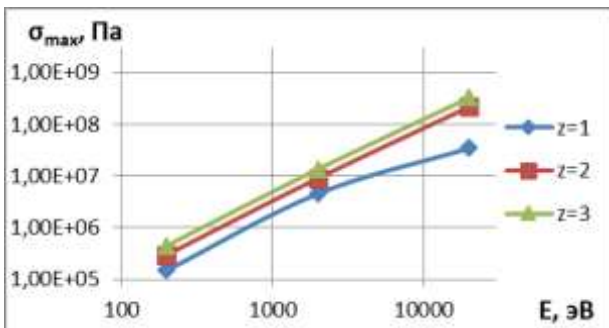
б



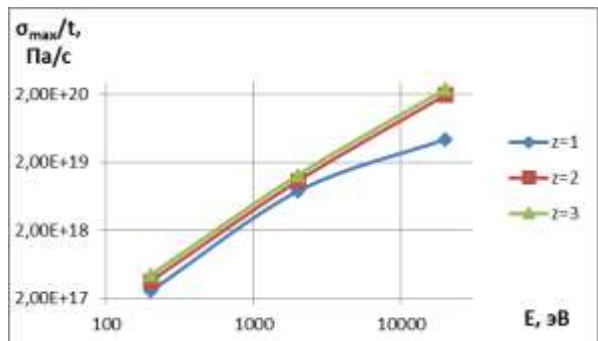
в



г

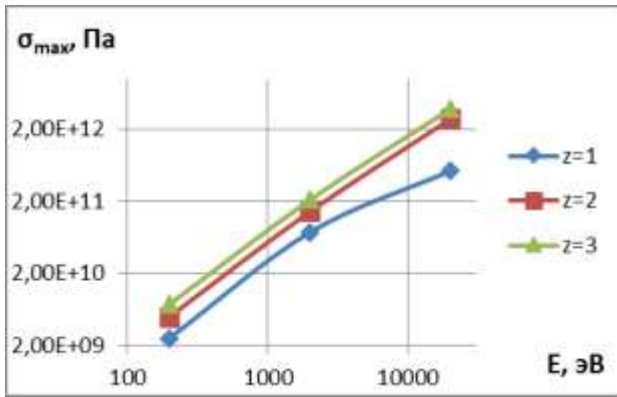


д

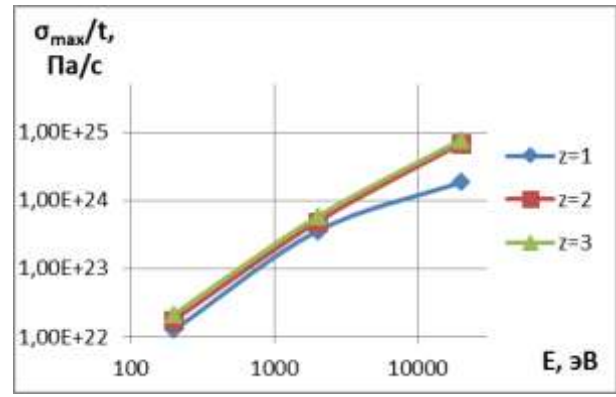


е

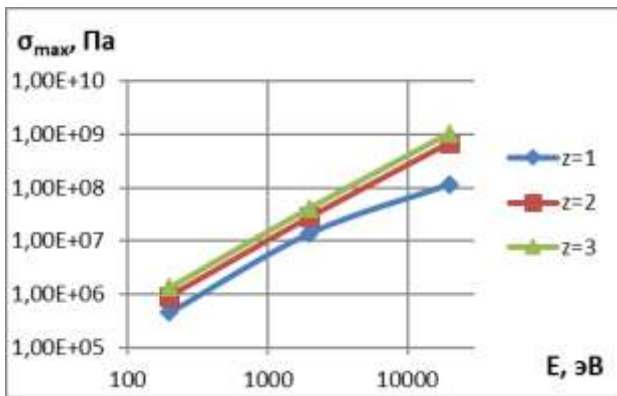
Рисунок 1 – Зависимости максимальных температурных напряжений (а, в, д) и скорости изменения температурных напряжений (б, г, е) при действии ионов бора (B^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20



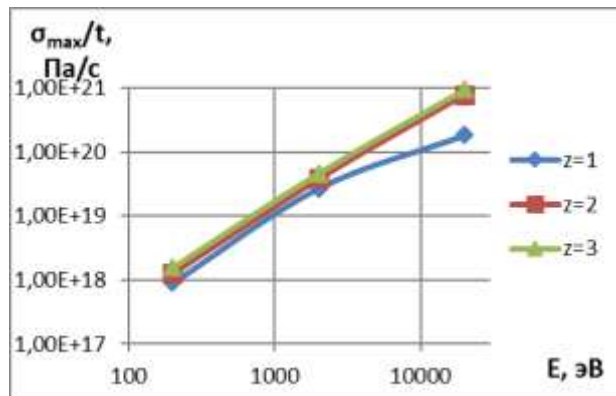
а



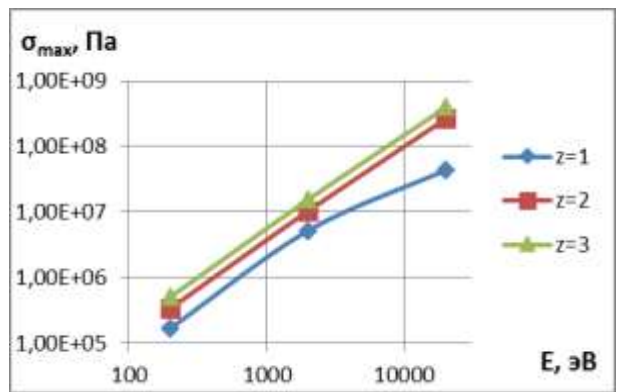
б



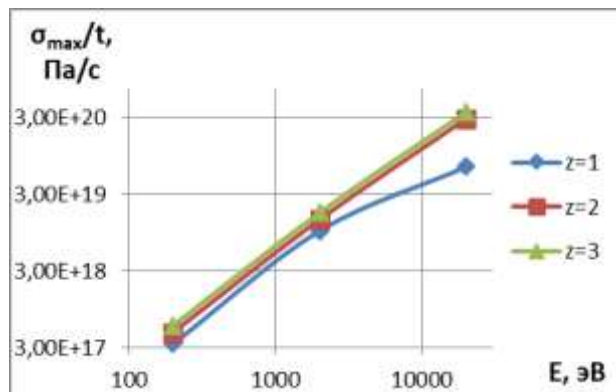
в



г

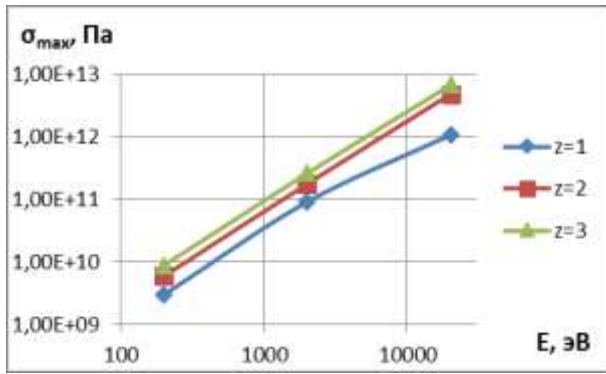


д

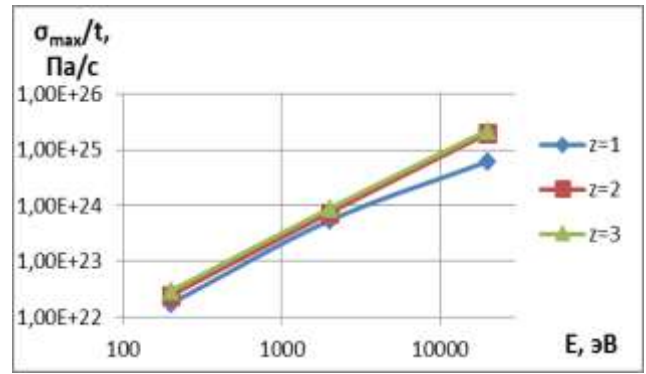


е

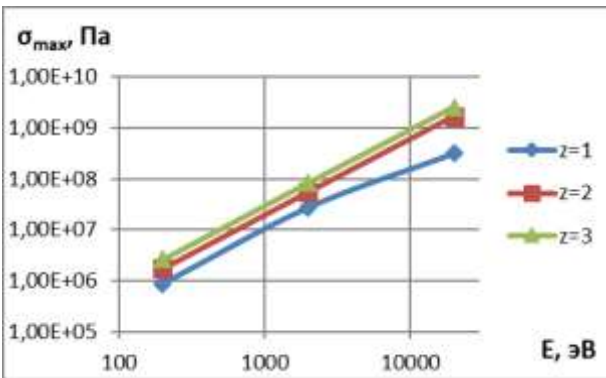
Рисунок 2 – Зависимости максимальных температурных напряжений (а, в, д) и скорости изменения температурных напряжений (б, г, е) при действии ионов азота (N^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20



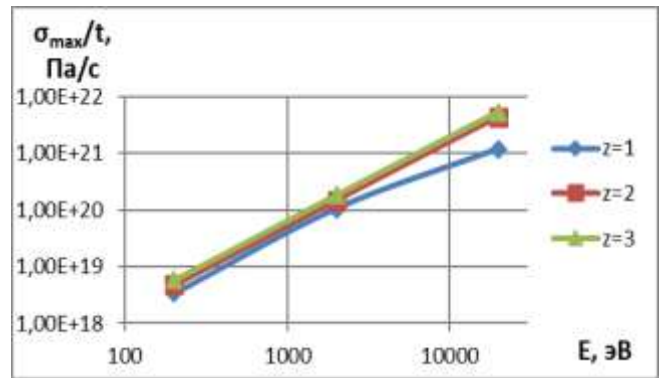
а



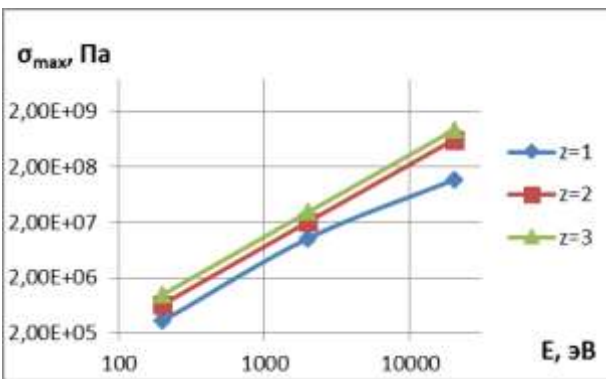
б



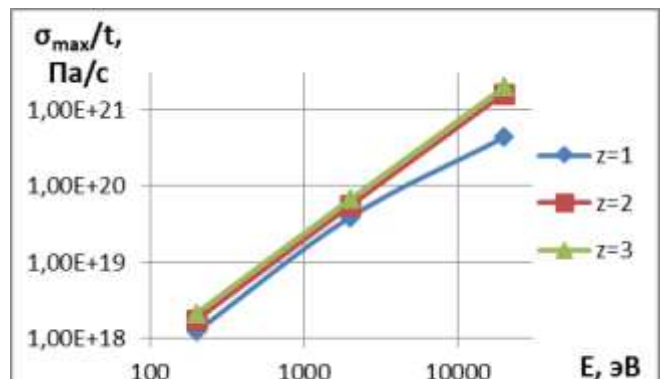
в



г

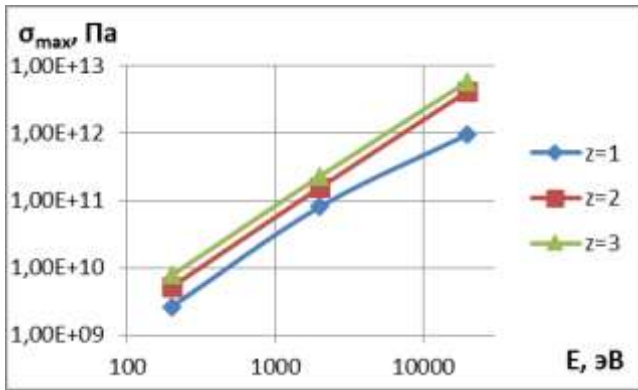


д

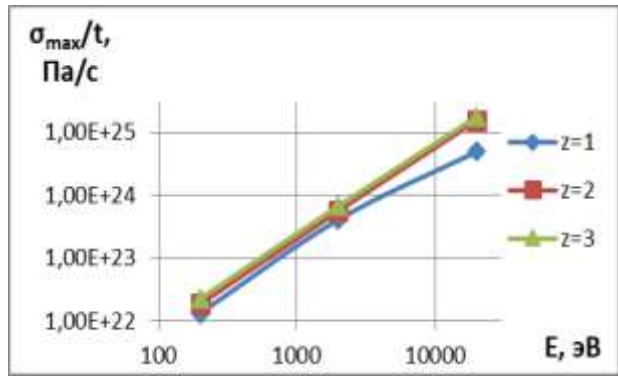


е

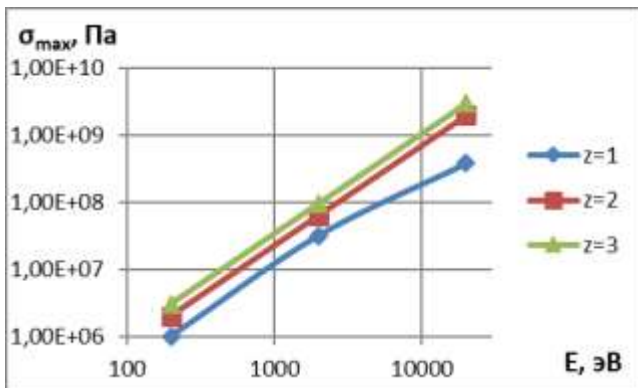
Рисунок 3 – Зависимости максимальных температурных напряжений (а, в, д) и скорости изменения температурных напряжений (б, г, е) при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20



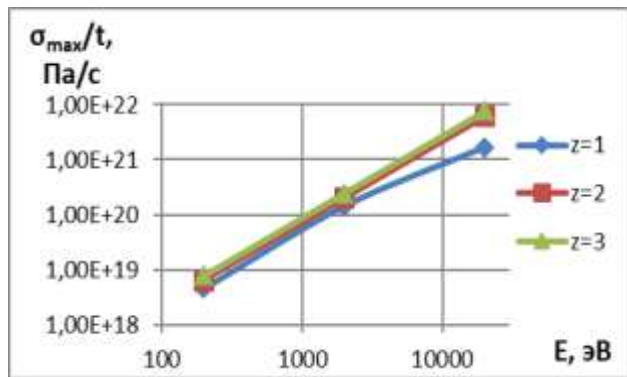
а



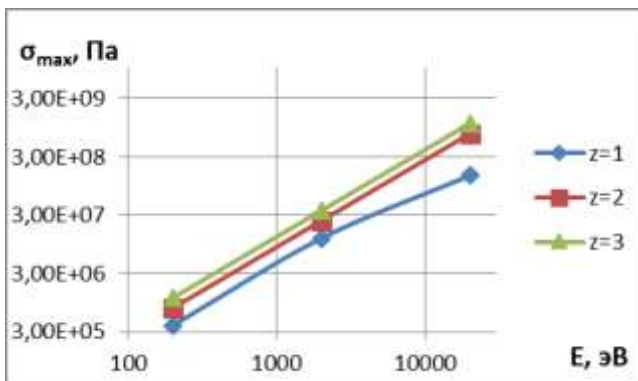
б



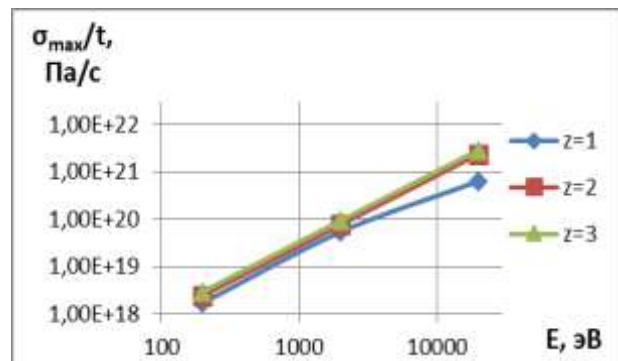
в



г



д



е

Рисунок 4 – Зависимости максимальных температурных напряжений (а, в, д) и скорости изменения температурных напряжений (б, г, е) при действии ионов гафния (Hf^z) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20

Для твёрдых сплавов ВК10 модифицированного и ВК20 образование НС за счёт действия температурных напряжений нереально и даже ускорение процесса образования НС за счёт других критериев мало вероятно.

Скорости деформирования в результате действия температурных напряжений высоки, но без реализации достаточных величин напряжений не смогут обеспечить получения НС.

Список литературы

1. Костюк Г. И., Бруйка О. О., Евсеенкова А. В. *О влиянии доли карбида титана на образование наноструктур в твердых сплавах (Al_2O_3 , TiC) при разном их соотношении* / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 60–63.
2. Костюк Г. И., Семенов О. Д., Широкий Ю. В., Воляк Е. А. *Эффективность образования наноструктур на поверхности твердого сплава V3 и способ задания теплофизических и термомеханических характеристик* / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 63–67.
3. Костюк Г. И., Тимофеев А. Г. *Эффективность и работоспособность режущего инструмента из твердого сплава Сандвик Коромант с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN при фрезеровании титанового сплава VT22* / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С.52–55.
4. Костюк Г. И. *Влияние доли карбида вольфрама в твердых сплавах на объем зерна и возможность образования наноструктур* / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 57–60.
5. Костюк Г. И., Романов М. С., Торосян Г. Д., Попов В. В. *Эффективность и работоспособность режущего инструмента из модифицированного твердого сплава BK10 с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN при фрезеровании титанового сплава VT22* / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 55–57.
6. Костюк Г. И., Ляшенко А. М. *Эффективность применения фрез из модифицированного BK10 и Сандвик Коромант с покрытием 0,2HfN+0,8ZrN при обработке титанового сплава VT22* / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. С. 67–69.
7. Костюк Г. И., Евсеенкова А. В. *Эффективное фрезерование титанового сплава VT22 режущим инструментом из модифицированного твердого сплава BK10 с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN* / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – 2018. – №34 (1310) 2018. С. 57–61.
8. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы*: моногр. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. 648 с.
9. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с нанопокрывтиями и наноструктурными модифицированными слоями*: Монография-справочник: в 2 кн. Харьков: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с., Кн.2. Лазерные технологии. – 507 с.
10. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур*: моногр. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. 472 с.
11. Костюк Г. И. *Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий*. – Киев: Изд-во АИНУ, 2002.– Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с. Кн. 2: справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.
12. Костюк Г. И. *Наноструктуры и нанопокрывтия: перспективы и реальность*. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. 406 с.
13. Костюк Г. И. *Научные основы создания современных технологий*. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Кн.1 2008. – 552 с. Кн.2 *Плазменно-ионные, ионно-лучевые и лазерные технологии*. 2018. 383 с.
14. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем*: моногр.-справ. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. 633 с.
15. Гречихин Л. И., *Физика наночастиц и нанотехнологий*. – Москва: УП «Технопринт», 2004. 397 с.
16. Гусев А. И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. – Москва: Физматлит, 2005. 416 с.
17. Андриевский Р. А., Рагуля А. В. *Наноструктурные материалы*. – Москва: Издательский центр «Академия», 2005. 117 с.

References (transliterated)

1. Kostyuk G. I., Bruyaka O. O., Yevseyenkova A. V. *O vliyani doli karbida titana na obrazovaniye nanostruktur v tverdykh splavakh (Al_2O_3 , TiC) pri raznom ikh sootnoshenii* [On the effect of titanium carbide fraction on the formation of nanostructures in hard alloys (Al_2O_3 , TiC) with their different ratios] / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. – Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 60–63.
2. Kostyuk G. I., Semenenko O. D., Shirokiy Yu. V., Volyak Ye. A. *Effektivnost' obrazovaniya nanostruktur na poverkhnosti tverdogo splava V3 i sposob zadaniya teplofizicheskikh i termomekhanicheskikh kharakteristik* [The efficiency of formation of nanostructures on the surface of a hard alloy V3 and the method of specifying thermal and thermomechanical characteristics] / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 63–67.
3. Kostyuk G. I., Timofeyev A. G. *Effektivnost' i rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta iz tvordogo splava Sandvik koromant s pokrytiyem 0,18HfN+0,82ZrN pri frezerovanii titanovogo splava VT22* [Efficiency and performance of cutting tools made of sandvik corvant tangent alloy with a coating of 0,18HfN+0,82ZrN when milling titanium alloy VT22] / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp.52–55.
4. Kostyuk G. I. *Vliyaniye doli karbida vol'frama v tverdykh splavakh na ob'yem zerna i vozmozhnost' obrazovaniya nanostruktur* [Influence of the share of tungsten carbide in hard alloys on the volume of grain and the possibility of the formation of nanostructures] Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 57–60.
5. Kostyuk G. I., Romanov M. S., Torosyan G. D., Popov V. V. *Effektivnost' i rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta iz modifitsirovannogo tvordogo splava VK10 s pokrytiyem 0,18HfN+0,82ZrN pri frezerovanii titanovogo splava VT22* [Efficiency and operation of the cutting tool from the modified creative alloy VK10 with a coating of 0,18HfN + 0,82ZrN when milling titanium alloy VT22] / Proceedings of XIII international conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 55–57.
6. Kostyuk G. I., Lyashenko A. M. *Effektivnost' primeneniya frez iz modifitsirovannogo VK10 i Sandvik Koromant s pokrytiyem 0,2HfN+0,8ZrN pri obrabotke titanovogo splava VT22* [The effectiveness of the use of modified VK10 and Sandvik Koromant mills with a coating of 0,2NfN + 0,8ZrN in the processing of titanium alloy VT22] / Proceedings of XIII International conference on science and education, January 4–13. Hajduszoboszlo (Hungary), 2019. pp. 67–69.
7. Kostyuk G. I., Yevseyenkova A. V. *Effektivnoye frezerovaniye titanovogo splava VT22 rezhushchim instrumentom iz modifitsirovannogo tvordogo splava VK10 s pokrytiyem 0,18HfN+0,82ZrN* [Effective milling of titanium alloy VT22 with a cutting tool made of modified creative alloy BK10 with a coating of 0,18HfN+0,82ZrN] / Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPi». Seriya: Tekhnologii v mashinobuduvanni [Technology in Machines]. 2018. No34 (1310) 2018. pp. 57–61.
8. Kostyuk G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy* [Nanotechnologies: theory, experiment, technology, prospects]: monogr. Kiyev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy [Ed. center of Intern. Academy of Sciences and innov. technology], 2012. 648 p.
9. Kostyuk G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s nanopokrytiyami i nanoskurnymi modifitsirovannymi sloyami* [Efficient cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers]: Monografiya-spravochnik: v 2 kn. Khar'kov: «Planeta-Print», 2016. – Kn.1. *Plazmenno-ionnyye i ionno-luchevyye tekhnologii* [Plasma-ion and

- ion-beam technologies]. 735 p., Kn. 2. Lazernyye tekhnologii [Laser technology]. 507 p.
10. Kostyuk G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur* [Nanotechnology: the choice of technological parameters and installations, processing performance, physical and mechanical characteristics of nanostructures]: monogr. Kiyev: Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy [Ed. center of Intern. Academy of Sciences and innov. technology], 2014. 472 p.
 11. Kostyuk G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy nanoseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical and technical principles of coating, ion implantation and ion doping, laser processing and hardening, combined technologies]. Kiyev: Izd-vo AINU, 2002. Kn.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. Kn. 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Handbook for calculating the main physical and technological parameters, assessing the possibilities, choosing the type of technologies and equipment]. 482 p.
 12. Kostyuk G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost'* [Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality]. Khar'kov: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
 13. Kostyuk G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy* [Scientific basis for the creation of modern technology]. Khar'kov: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», Kn.1 2008. – 552 s. I Kn.2 *Plazmenno-ionnyye, ionno-luchevyye i lazernyye tekhnologii* [Plasma-ion, ion-beam and laser technologies]. 2018. 383 p.
 14. Kostyuk G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem* [Efficient cutting tool with coated and hardened layer]: monogr.-sprav. Khar'kov: Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
 15. Grechikhin L. I., *Fizika nanochastits i nanotekhnologiy* [Nanoparticle Physics and Nanotechnology]. Moskva: UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
 16. Gusev A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moskva: Fizmatlit, 2005. 416 p.
 17. Andriyevskiy R. A., Ragulya A. V. *Nanostrukturnyye materialy* [Nanostructured Materials]. Moskva: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. 117 p.

Надійшла (received) 22.02.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Gennadiy Kostyuk) – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7584-2240>; e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com

Попов Віктор Васильович (Попов Виктор Васильевич, Viktor Popov) – кандидат технічних наук, ПАО «ФЭД»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9189-6882>; e-mail: vvpopov123@gmail.com

Євсєнкова Анна Володимирівна (Евсєнкова Анна Владимировна, Anna Yevseyenkova) – Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9094-3974>; e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com

А.Н. ЖУКОВ**ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОИСКА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТОРЦЕВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УПЛОТНЕНИЙ**

В статье представлена формализованная методика определения рационального варианта технологии изготовления элементов торцевых импульсных уплотнений (ТИУ), которая позволяет составить планы возможных комбинаций решений, минимизированные по трудоемкости реализации. Приведена модель синтеза интегрированной технологии, которая учитывает условия эксплуатации ТИУ, физические принципы работы оборудования и позволяет, в соответствии с технологическими ограничениями, формировать функциональные покрытия с заданными эксплуатационными свойствами на рабочих поверхностях элементов ТИУ.

Ключевые слова: торцовое импульсное уплотнение, формализация, функциональные покрытия, рациональный вариант технологии.

О.М. ЖУКОВ**ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПОШУКУ РАЦІОНАЛЬНОГО ВАРІАНТУ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНЯХ ТОРЦЕВИХ ІМПУЛЬСНИХ УЩІЛЬНЕНЬ**

У статті наведена формалізована методика визначення оптимального варіанту технології виготовлення елементів торцевих імпульсних ущільнень (ТІУ), яка дозволяє скласти плани можливих комбінацій рішень, що мінімізовані по трудомісткості реалізації. Наведено модель синтезу інтегрованої технології, яка враховує умови експлуатації ТІУ, фізичні принципи роботи обладнання і дозволяє, відповідно до технологічних обмежень, формувати функціональні покриття із заданими експлуатаційними властивостями на робочих поверхнях елементів ТІУ.

Ключові слова: торцеве імпульсне ущільнення, формалізація, функціональні покриття, раціональний варіант технології.

A. ZHUKOV**FORMALIZATION OF THE RATIONAL VARIANT SEARCH OF THE FORMING FUNCTIONAL COATINGS TECHNOLOGY ON THE FACE IMPULSE SEALS WORKING SURFACES**

The article presents a formalized method for determining a rational variant of the face impulse seals (FIS) elements manufacturing technology, which allows you to make plans for possible combinations of solutions, minimized by the complexity of the implementation. The model of the integrated technology synthesis is given, which takes into account the operating conditions of FIS, the physical principles of equipment operation and allows, in accordance with technological limitations, to form functional coatings with specified operational properties on working surfaces of FIS elements.

Keywords: impulse face seal, formalization, functional coatings, a rational variant of technology.

Введение. Одним из самых распространенных уплотнительных элементов, широко применяемых в насосах, компрессорах и различных химических аппаратах, является торцевое импульсное уплотнение (ТИУ) [1]. Оно представляет собой герметизирующее устройство, состоящее из двух деталей в виде колец – одно из которых вращается совместно с валом, а другое неподвижно, соединено с корпусом (рис. 1).



Рисунок 1 - Пример конструкции ТИУ фирмы «ТРИЗ»ЛТД, Украина

На торцах колец расположены плоские уплотняющие поверхности, изготовленные с высоким качеством, характеризующимся геометрическими параметрами, структурой, упрочнением, остаточными напряжениями и др.

На работоспособность уплотнений влияют конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы. Важнейшими из них являются свойства рабочей и окружающей сред, режимы работы, свойства материалов герметизируемого соединения и уплотнителя, допустимые пределы утечки, ресурс, общий срок эксплуатации, токсичность и химическая агрессивность сред [2].

Постановка проблемы. Необходимость использования системного подхода при проведении исследований требует анализа целесообразного использования направленного выбора технологий обеспечения требуемого качества поверхностных слоев колец на всех стадиях их жизненного цикла. Система направленного выбора технологии обеспечения требуемого качества рабочих поверхностей ТИУ охватывает весь их жизненный цикл, включающий в себя материал ТИУ и их элементов, технологию их изготовления, технологию ремонта и др. Все они рассматриваются через специальные методы направленного выбора. При этом необходимо учитывать влияние выбираемых методов

друг на друга, которое в конечном итоге будет сказываться на качестве изделия [3].

В настоящее время стало очевидным, что вопросы повышения износостойкости деталей трибосопряжений должны проводиться в тесной кооперации конструкторских, технологических и триботехнических решений. Правильный подбор материалов возможен только в том случае, если проведен анализ конструкционных и триботехнических характеристик узла трения и условий его работы.

На этапе конструкторской подготовки производства, при проектировании ТИУ, работающих в агрессивных средах с высокой коррозионной и химической активностью и в условиях экстремальных температур (от высоких к криогенным), важно знать методы, использование которых может обеспечить требуемые характеристики поверхности и в соответствии с этим назначать ее качественные показатели (технологическая рациональность конструкции). Как показывает практика производств таких методов может быть много [4].

Методика исследований. Учитывая особенности эксплуатации ТИУ, описанные [4,5] можно сформулировать требования к функциональным покрытиям, которые необходимо сформировать на их рабочих поверхностях (рис 2).

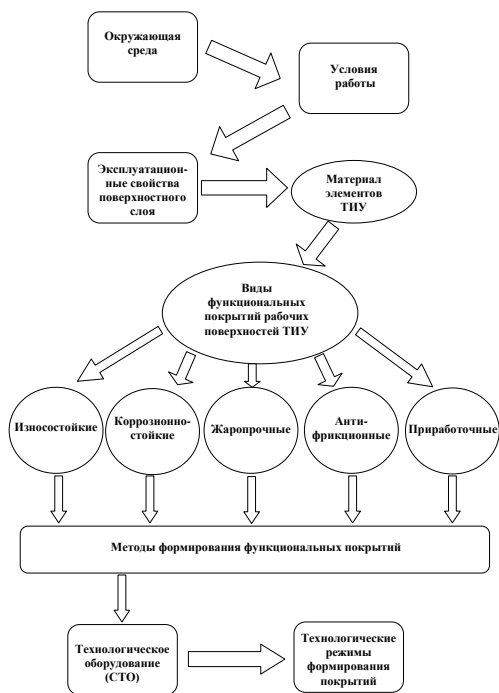


Рисунок 2 - Структура процедуры синтеза рациональной технологии формирования функциональных покрытий на поверхностях ТИУ

Так как задача выбора технологии формирования функциональных покрытий является инвариантной, т.е. реализуемой различными методами или их комбинацией, на первом этапе направленного выбора формируем матрицу достижимости решения задачи $R = [r_i]$, которая определяется следующим образом:

$$r_i = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } P_0 \text{ достижима из } P_i, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases},$$

где P_0 – решение задачи; P_i – элемент решения.

Так происходит отсев всех вариантов, которые не позволяют достичь необходимые требования (тупиковые варианты).

Оставшиеся, удовлетворяющие решению варианты, покажем в виде сетевой модели (рис 3). Сетевая модель представлена ориентированным графом, узлами которого являются этапы решения задачи, а ребрами трудоемкость их решения (технологическая себестоимость). Необходимо определить кратчайший путь из вершины P_0 в вершину G_n^k . Для этого составляются планы прохождения пути, позволяющие решить задачу различными методами. На первом этапе разбивается множество всех путей, которые ведут из вершины P_0 в вершину G_n^k на не пересекаемые подмножества. В качестве оценки ξ_i , возьмем длину ребер графа, являющимися частью пути, при этом для на полного пути всегда будет $\geq \xi_i$ где i - номер конкретного этапа. Из этих подмножеств формируем планы реализации задачи в зависимости от условий эксплуатации ТИУ.

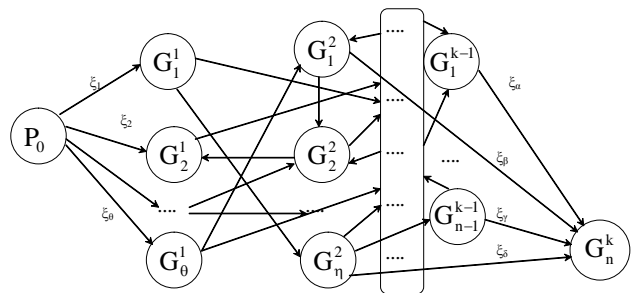


Рисунок 3 - Сетевая модель поиска варианта решения задачи

Далее результат поиска будет сводиться к решению задачи целочисленного программирования комбинаторного вида, то есть задачи, в которой решение ищется на конечном множестве возможных значений переменных. Наиболее распространенными среди комбинаторных методов является метод «ветвей и границ» [6].

Рассмотри задачу дискретного программирования с применением метода вервей и границ для условия поиска рационального варианта технологии формирования функциональных покрытий на поверхности элементов ТИУ в зависимости от условий их работы и свойств окружающей среды. Выбор рационального технологического процесса в конкретных производственных условиях выполняется в такой последовательности. Входными данными для проектирования является массив возможных вариаций технологий $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$, которые позволяют получить на поверхности ТИУ необходимое функциональное покрытие. Формирование массива производится с учетом требований к качеству

поверхности, ограничений по реализации технологического процесса. На следующем этапе определяется производственная себестоимость C_{n1} получения покрытия одного варианта технологического процесса из указанного выше массива $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$. После этого первому технологическому процессу присваивается статус базового технологического процесса $n_0 = n = 1$ и соответственно его себестоимость есть минимальной, т.е. $C_{n \min} = C_{n1}$. Базовый технологический процесс исключается из массива $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$. Далее в цикле берется следующий технологический процесс из массива $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ под номером $n = n + 1$ и определяется его производственная себестоимость C_n . Данный технологический процесс называем текущим. После этого сравнивается производственная себестоимость базового варианта и текущего варианта. Если себестоимость базового варианта меньше, чем текущего варианта, то текущий технологический процесс исключается из массива $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ и далее рассматривается следующий технологический процесс.

Если себестоимость текущего варианта меньше, чем базового, то текущему варианту присваивается статус базового, текущей себестоимости присваивается статус минимальной. Данный технологический процесс исключается из массива $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$.

После этого переходят к рассмотрению следующего технологического процесса из массива $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$. Таким образом, рассматриваются все технологические процессы, которые попали в массив возможных вариантов технологий $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$. По окончании цикла базовый вариант технологии будет являться рациональным для получения функционального покрытия на рабочей поверхности ТИУ в данных производственных условиях.

Процедура формирования массива технологий $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ представлена на рис. 4. На схеме приняты обозначения: λ' , ϖ' , γ' , β' – количество доступных вариантов при каждом вхождении в цикл расчетов техпроцессов, технологического оборудования, методов формирования покрытий, комбинаций слоев соответственно.

Формирование массива $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ происходит следующим образом. Технолог, в режиме диалога, вводит материал кольца ТИУ. Далее с применением базы знаний рассматриваются возможные варианты функционального покрытия. Под каждый вариант выполняется подбор комбинаций слоев.

Имея вариант комбинации и используя базу данных, осуществляем поиск возможных методов формирования конкретного слоя покрытия.

Определив множество методов, в автоматическом режиме осуществляем подбор технологического оборудования (из состава, имеющегося на предприятии), позволяющего реализовать данный метод.

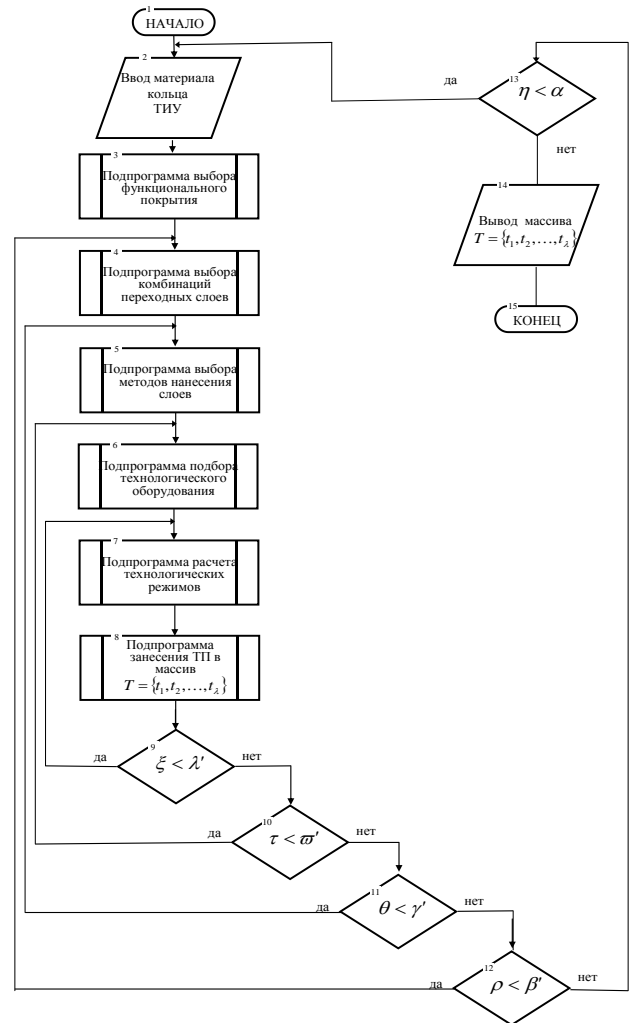


Рисунок 4 - Алгоритм формирования массива технологических процессов $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ получения функционального покрытия с заданными эксплуатационными свойствами на поверхности ТИУ

По каждому оборудованию выполняется расчет технологических режимов, нормирование операций и формирование данных для технологической документации. Каждому технологическому процессу присваивается свой индекс, под которым он заносится в базу данных массива $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$.

Результаты исследований. Процедура поиска рационального варианта технологии формирования функциональных покрытий на поверхности ТИУ выполняется согласно следующей методике.

Шаг 1. Под каждый вариант материала основы (МО) поверхности ТИУ формируется массив возможных комбинаций решений. Каждая ячейка матрицы представляет собой множество решений $\{P_0\}$ в рамках одной m – комбинации для каждого v – го варианта материала кольца ТИУ.

Шаг 2. В соответствии с каждым вариантом решения задачи формируется матрица множества доступных методов ($\{M\}$) по всем вариантам решения P_0 . Каждая ячейка матрицы представляет собой ϕ – множество доступных методов $\{M\}$ в рамках одной m

– комбинации. Построение происходит для всех ν комбинаций материала кольца ТИУ.

Шаг 3. Подбираем средства технологического оснащения, позволяющие реализовать конкретный метод, или их комбинацию при формировании функционального покрытия ТИУ. Каждый θ - й метод можно реализовать ζ - совокупностью средств технологического оснащения. В результате формируется матрица размерностью $(\theta \times \zeta)$.

Шаг 4. В зависимости от физических принципов работы оборудования, доступных технологических режимов, формируем матрицу вариантов технологических процессов формирования функциональных покрытий на поверхности ТИУ, удовлетворяющих заданным показателям качества согласно установленным технологическим ограничениям.

Шаг 5. В результате направленного выбора под каждый вариант материала кольца ТИУ, в зависимости от среды эксплуатации (условий работы ТИУ), формируется матрица технологий формирования функциональных покрытий.

Шаг 6. В рамках каждого «плана» поиска варианта решения задачи производится определение технологической себестоимости в условиях конкретного предприятия. План, имеющий минимальную себестоимость решения задачи принимается как оптимальный, в рамках своей комбинации вариантов решения, а из них формируется матрица минимизированных технологий реализации задачи (рис. 5).

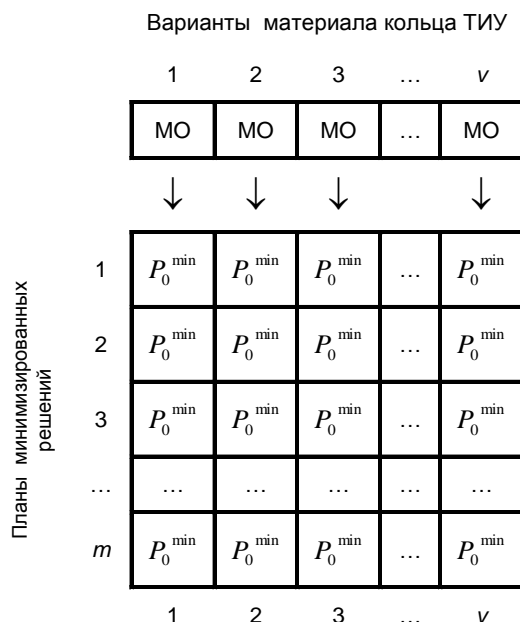


Рисунок 5 – Формирование матрицы планов минимизированных решений задачи получения функциональных покрытий на рабочих поверхностях ТИУ.

Шаг 7. Рациональный вариант технологии формирования функциональных покрытий на рабочих поверхностях ТИУ, с учетом совокупности доступных планов (в зависимости от среды эксплуатации ТИУ),

определяется из массива минимизированных решений согласно условию:

$$P_0^{opt} = \lim_{C_{mex} \rightarrow \min} P_0 | C_{mex} \in \{C_{P_0}\}.$$

Выводы. Приведенная формализованная методика определения рационального варианта технологии изготовления элементов торцевых импульсных уплотнений позволяет сгенерировать планы реализации возможных комбинаций решений. Результатом направленного выбора технологии, обеспечивающей требуемые эксплуатационные свойства рабочих поверхностей торцевых импульсных уплотнений насосного оборудования, будет минимизированный по критерию себестоимости технологический процесс формирования функциональных покрытий. При этом учитываются не только стоимостные, но и экологические характеристики процесса. Следует отметить, что экологические характеристики могут быть использованы в качестве самостоятельного критерия оптимизации при принятии предварительно отобранных экономически целесообразных вариантов.

Список литературы

1. Тарельник В.Б., Жуков А. Н., Коноплянченко Е.В., Белоус А.В., Волошко Т.П. Повышение надежности импульсных торцевых уплотнений. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. № 5. С. 43-54.
2. Данилейко О.В., Ладенко С.В., Жуков А.Н. Повышение надежности и эффективности торцевого уплотнения для компрессора углекислого газа. *Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Сер.: Техн. в машинобудуванні. – Харків, 2018. № 1282, вип. 6. С.43-49.
3. Жуков А.Н. Направленный выбор технологии и установление критериев оценки наиболее рационального метода упрочнения колец торцевых уплотнений. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. Сумы. 2017. № 47, вып. 1. С. 15-20.
4. Tarel'nik, V.B., Martsinkovskii, V.S., Zhukov, A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3 // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. V.53, pp. 385-389. doi: 10.1007/s10556-017-0351-5
5. Загорулько А.В., Лісовенко Д.В., Марцинковський В.С. Розробка та дослідження торцевого запірного імпульсного ущільнення відцентрового компрессора // *Восточно – Европейський журнал передових технологій*. 2016. Т. 1, №7(79). С.30-39. doi:10.15587/1729-4061.2016.59884
6. Токарева В.І. *Математичне програмування*. Київ: Центр учбової літератури, 2007. 232с.

References (transliterated)

1. Tarel'nik V.B., Zhukov A. N., Konopljanchenko E.V., Belous A.V., Voloshko T.P. Povyshenie nadezhnosti impul'snyh torcevyh uplotnenij [Improving the reliability of pulse mechanical seals]. *Tekhnichnij servis agropromisloвого, lisovogo ta transportnogo kompleksiv*. 2016. no. 5, pp. 43-54.
2. Dany`lejko O.V., Ladenko S.V., Zhukov A.N. Povyshenie nadezhnosti i jeffektivnosti torcovogo uplotnenija dlja kompressora uglekislogo gaza [Improving the reliability and efficiency of the mechanical seal for a carbon dioxide compressor]. *Visn. Nacz. tehn. un-tu «ХПІ» Ser.: Техн. v mashy'nobuduванні [Bulletin of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute". Series: Technologies in mechanical engineering]. Kharkov, 2018. no.1282, issue 6, pp. 43-49.*
3. Zhukov A.N. Napravlenyj vybor tehnologii i ustanovlenie kriteriev ocenki naibolee racional'nogo metoda uprochnenija kolec torcevyh uplotnenij [Directional selection of technology and the establishment of criteria for assessing the most rational method of hardening the

- rings of the face seals]. *Kompressorное i jenergeticheskoe mashinostroenie* [Compressor and power engineering]. Sumy, 2017 no. 47, issue 1, pp. 15-20.
4. Tarel'nik, V.B., Martsinkovskii, V.S., Zhukov, A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017, vol. 53, pp. 385-389. doi: 10.1007/s10556-017-0351-5
 5. Zagorulko A.V. Lysovenko D.V., Martsinkovsky V.S. Rozrobka ta doslidzhennja torcovogo zapirnogo impul'snogo ushil'nennja vidcentrovogo kompressora [Development and research of the face shutter impulse seal of a centrifugal compressor]. *Vostochno – Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2016, vol. 1, no.7(79), pp.30-39. doi:10.15587/1729-4061.2016.59884
 6. Tokareva V.I. Matematichne programuvannja [Mathematical programming]. Kyiv, Centr uchbovoi literatury, 2007. 232p.

Поступила (received) 04.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жуков Олексій Миколайович (Жуков Алексей Николаевич, Aleksey Zhukov) – аспірант, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна; тел.: (050) 400-23-342, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7886-6993>; e-mail: technology@i.ua

В.Б. ТАРЕЛЬНИК, Б.А. САРЖАНОВ

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ОДНОВРЕМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИСТОВ

В статье предлагаются новые экологически безопасные способы восстановления и одновременного упрочнения дисков почвообрабатывающих машин, изготавливаемых из листового проката (ДСТУ 8540:2015) стали 65Г, которые в процессе работы подвергаются абразивному износу незакрепленным абразивом. Способы включают удаление изношенной части диска и замену ее отдельными сегментами, которые также изготавливаются из листового проката. При этом удаление изношенной части детали, замена ее отдельными сегментами и упрочнение поверхностей, подвергаемых в процессе работы абразивному изнашиванию, осуществляется экологически безопасными методами. Отличие способов состоит в различной технологии присоединения сегментов к диску. В первом способе сегменты соединяются с диском по прессовой посадке, а во втором, вставляя шип сегмента в паз диска, после чего, как в первом, так и во втором случае дополнительно фиксируют соединение при помощи заклепок, винтов или других крепежных элементов. При этом в обоих случаях обеспечивается неразъемное соединение сегмента с диском. Диск и присоединяемые к нему сегменты, могут быть изготовлены как из одинаковых, так и различных материалов, проходить при этом термическую обработку и подвергаться дополнительному упрочнению любым известным способом, как отдельно, так и совместно.

Ключевые слова: диски почвообрабатывающих машин, сегменты, экологическая безопасность, абразивный износ, сталь 65Г, цементация электроэрозийным легированием.

В.Б. ТАРЕЛЬНИК, Б.О. САРЖАНОВ

ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИЙ СПОСІБ ВІДНОВЛЕННЯ І ОДНОЧАСНОГО ЗМІЦНЕННЯ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ З МЕТАЛЕВИХ ЛИСТІВ

У статті пропонуються нові екологічно безпечні способи відновлення і одночасного зміцнення дисків ґрунтообробних машин, що виготовляються з листового прокату (ДСТУ 8540:2015) стали 65Г, які в процесі роботи піддаються абразивного зносу незакріпленим абразивом. Способи включають видалення зношеної частини диска і заміну її окремими сегментами, які також виготовляються з листового прокату. При цьому видалення зношеної частини деталі, заміна її окремими сегментами і зміцнення поверхонь, що піддаються в процесі роботи абразивного зношування, здійснюється екологічно безпечними методами. Відмінність способів полягає в різній технології приєднання сегментів до диска. У першому способі сегменти з'єднуються з диском по пресовій посадці, а в другому, вставляючи шип сегмента в паз диска, після чого, як в першому, так і в другому випадку додатково фіксують з'єднання за допомогою заклепок, гвинтів або інших кріпильних елементів. При цьому в обох випадках забезпечується нероз'ємне з'єднання сегмента з диском. Диск і приєднуються до нього сегменти, можуть бути виготовлені як з однакових, так і різних матеріалів, проходити при цьому термічну обробку і піддані додатковому зміцненню будь-яким відомим способом, як окремо, так і спільно.

Ключові слова: диски ґрунтообробних машин, сегменти, екологічна безпека, абразивний знос, сталь 65Г, цементация електроерозійним легуванням.

V. TARELNYK, B. SARZHANOV

ENVIRONMENTALLY SAFE METHOD OF RESTORATION AND SIMULTANEOUS STRENGTHENING OF STEEL PARTS MANUFACTURED FROM METAL SHEETS

The article proposes new environmentally friendly methods for restoring and simultaneously hardening the discs of tillage machines made of sheet steel (DSTU 8540: 2015) 65G steel, which in the process of work are subjected to abrasive wear with loose abrasive. The methods include removing the worn part of the disk and replacing it with individual segments, which are also made of sheet metal. At the same time, the removal of the worn-out part of the part, its replacement with separate segments and the hardening of the surfaces subjected to abrasive wear in the course of work are carried out by environmentally friendly methods. The difference lies in the different technology of joining segments to the disk. In the first method, the segments are connected to the disc by pressing fit, and in the second, inserting the segment spike into the disc groove, after which, both in the first and in the second case, the connection is additionally fixed with rivets, screws or other fasteners. In both cases, the permanent connection of the segment with the disc is provided. The disk and the segments attached to it can be made of the same or different materials, undergo thermal treatment and undergo additional strengthening by any known method, either separately or together.

Keywords: disks of tillage machines, segments, environmental safety, abrasive wear, steel 65G, cementation by electroerosion doping.

Введение. Абразивный износ является неизбежной проблемой эксплуатации оборудования. Многие ответственные детали машин, работающих в различных областях сельскохозяйственного, химического и нефтегазового машиностроения, изготавливаются из стальных металлических листов и в зависимости от условий внешнего воздействия, подвергаются различным видам абразивного износа: закрепленным или незакрепленным абразивом, гидроабразивному или газоабразивному. Технология восстановления таких деталей включает в себя удаление изношенных участков и замену их отдельными сегментами, изготовленными, как правило, из стальных листов такой же марки. Прикрепление сегментов на изношенные участки

обычно осуществляют различными видами сварки. Нередко, с целью более эффективной защиты от абразива, поверхность сегментов подвергают различным видам упрочнения (наплавка твердыми и износостойкими материалами, химико-термическая обработка, плазменное напыление и др.). При этом удаление изношенной части детали, замена ее отдельными сегментами и упрочнение поверхностей, подвергаемых в процессе работы абразивному изнашиванию, нередко осуществляется методами, оказывающими вредное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, несмотря на наличие ряда известных экологически безопасных способов упрочнения и восстановления, изнашиваемых участков

© В.Б. Тарельник, Б.А. Саржанов, 2019

поверхностей деталей, проблема не утратила своей актуальности.

Постановка проблемы. Анализ последних исследований и публикаций. Рабочие органы почвообрабатывающих машин работают в почвенной среде, являющейся сильным абразивом. Сферические диски в качестве рабочих органов орудий, предназначенных для обработки почвы, широко используются на таких почвообрабатывающих машинах как плуги, лущильники, сеялки, бороны, картофелесажалки и пр. Изготавливают диски зачастую из сталей 65Г и 70Г. Твердость рабочей зоны дисков после термической обработки составляет HRC 35-45. Режущие кромки дисков могут быть также упрочнены лазерно-термической обработкой на ширину 15-20 мм и на глубину 0,5-1,5 мм [1].

Применяются и другие методы упрочнения, используемые, в основном, в машиностроении: электроискровое и электроимпульсное упрочнение, детонационно-газовое напыление, метод намораживания [2].

Под действием агрессивной абразивной среды лезвие диска быстро изменяет свою форму, что приводит к его затуплению и потере работоспособности. Величина износа и характер затупления лезвий сферических дисков зависят от ряда факторов: свойств материала дисков, физико-механических свойств почвенной среды (прочности, липкости, пластичности, упругости, плотности, влажности, фрикционных свойств и пр.), геометрической формы диска, параметров лезвия и условий работы (скорости движения агрегата, глубины обработки, угла атаки и др.) [3].

При восстановлении дисков используют наплавку твердыми сплавами сормайт, ВК2, ВК3, высоколегированный чугун, сталинит, вокар и другие материалы. Кроме этого, применяют электроды для наплавки Т-590, ОЗН-6 АЕ НД и их аналоги, порошковые проволоки ПП-АН170М, ПП-Нп80Х10РМТ, ПП-Нп30Х5Г2СМ, порошковые ленты ПЛАН-101 и ПЛАН-111, которые без термической обработки позволяют получать наплавленную поверхность с твердостью HRC 58-64 [4].

Эффективным процессом является технология упрочнения поверхности дисковых рабочих органов путем насыщения поверхностного слоя углеродом до получения структуры белого чугуна. Рабочие органы, подвергнутые науглероживанию, имеют ресурс примерно равный ресурсу дисков, наплавленных твердым сплавом, и в 2 раза больше неупрочненных [5].

Одним из наиболее простых и доступных с технологической точки зрения методов насыщения стальных поверхностных слоев углеродом является способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) [6, 7], который имеет ряд достоинств, основными из которых являются: достижение 100% сплошности упрочнения поверхностного слоя; повышение твердости поверхностного слоя детали за счет диффузионно-закалочных процессов; легирование можно

осуществлять в строго указанных местах, не защищая при этом остальную поверхность детали; отсутствие объемного нагрева детали и связанных с этим поводов и короблений; простота применения технологии; гибкая привязка к имеющемуся оборудованию; процесс упрочнения не требует специальной подготовки и высокой квалификации рабочего.

При цементации стальных деталей ЭЭЛ толщина упрочненного слоя зависит от энергии разряда и времени легирования (производительности процесса). С увеличением энергии разряда и времени легирования толщина упрочненного слоя увеличивается. При этом возрастает и шероховатость поверхности. Так при ЭЭЛ углеродом среднеуглеродистой легированной стали 40Х (Ra = 0,5мкм) с производительностью 0,2 см²/мин при энергии разряда 6,8 Дж толщина слоя повышенной твердости составляет более 1,15 мм. Шероховатость поверхности при этом соответствует Ra = 11,7-14,0 мкм.

В [8, 9] предложен способ ЦЭЭЛ, который используют для снижения шероховатости поверхности деталей машин и, следовательно, для расширения области их применения. Данный способ состоит в том, что ЦЭЭЛ проводят поэтапно, снижая на каждом этапе энергию разряда.

Ниже приводятся конкретные примеры ремонта и упрочнения деталей, которые изготавливаются из стальных металлических листов, и применяются в машинах для обработки почвы в сельском хозяйстве.

Согласно [10] известна конструкция отвала корпуса плуга, которая предполагает производить его восстановление за счет приваривания дуговой сваркой компенсирующего износ элемента (вставки) в заранее удаленную изношенную область отвала. Вставка предварительно подвергается термической обработке до твердости 50...60 HRC по всей ее глубине. Для обеспечения необходимых механических свойств восстанавливаемого отвала производится наплавочное армирование области сварных швов.

Однако изготовление вставки, используемой для компенсации износа отвала, сопряжено с рядом трудностей. Главная из них заключается в том, что для получения высокой твердости вставки ее подвергают термической обработке. В результате выдержать требуемый радиус кривизны вставки, имеющей достаточно большую площадь, становится весьма затруднительным из-за ее коробления при термической обработке.

В [11] предлагается более прогрессивный способ восстановления и упрочнения отвала корпуса плуга, включающий удаление изношенной части отвала, изготовление компенсирующей износ профильной вставки, ее приваривание с рабочей стороны поверхности отвала, при этом размеры вставки выбирают исходя из условия расположения сварочного шва вне зоны интенсивного изнашивания отвала, и наплавку в области восстановления армирующих валиков из износостойкого электродного материала. При этом армирующие валики расположены перпендикулярно перемещению почвы на расстоянии

20 мм друг от друга, с выходом их в зону ожидаемого лучевидного износа отвала.

Недостатком данного способа является сильное термическое воздействие при наплавке армирующих износостойких валиков, т.к. наплавка происходит с глубоким проплавлением основного металла. Это приводит к короблению восстанавливаемых и упрочняемых отвалов. Кроме этого, способ не обеспечивает высокие износостойкость и ресурс восстановленных и упрочненных отвалов корпусов плугов при их эксплуатации на почвах, обладающих высокой изнашивающей способностью, прежде всего песчаных и супесчаных. Кроме этого, первый так и второй способ осуществляется за счет использования сварки, применение которой имеет свои негативные факторы это: большой расход электроэнергии; вредные условия процесса сварки для окружающей среды; отсутствие возможности использовать в качестве материала при восстановлении металлов: с удовлетворительной свариваемостью, когда свариваемый металл для предотвращения трещин предварительно нагревается, а после сварки нужна термообработка; с ограниченной свариваемостью, когда сталь склонна к образованию трещин и ее предварительно подвергают термообработке, а также термически обрабатывают после сварки; с плохой свариваемостью, когда металл имеет склонность к образованию трещин, и сварка производится с предварительной термообработкой, а подогрев проводится и после сварки.

Анализ литературных источников показал, что современные ремонтные технологии располагают достаточным количеством способов защиты деталей от абразивного износа: наплавка специальными электродами, твердыми сплавами сормайт, высоколегированным чугуном, сталинитом, газоплазменное напыление твердосплавными порошками, электроискровое и электроимпульсное упрочнение, детонационно-газовое напыление и др. Их применяют как при изготовлении, так и при ремонте оборудования. Каждый способ имеет, свои недостатки и преимущества. Основным недостатком таких ремонтных технологий как наплавка, напайка, газоплазменное напыление и сварка является их негативное воздействие на окружающую среду.

Следует отметить, что современная информационная и материальная сфера создания и существования изделий располагает большим количеством экологически безопасных методов, которые могут быть использованы при упрочнении и восстановлении деталей, изготавливаемых из стальных листов, и применяемых в машинах, предназначенных для обработки почвы в сельском хозяйстве.

Таким образом, целью работы является повышение безопасной деятельности предприятия и снижение негативного воздействия на окружающую среду ремонтных технологий, используемых при восстановлении и упрочнении рабочих органов почвообрабатывающих машин, изготавливаемых из стальных листов, за счет использования экологически чистых и безопасных методов ремонта и упрочнения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- повышение долговечности восстановленных и упрочненных деталей при их эксплуатации на почвах, обладающих высокой изнашивающей способностью;
- отсутствие коробления, а также повышение твердости и износостойкости восстановленных и упрочненных деталей в условиях интенсивного абразивного изнашивания;
- возможность использовать в качестве материала при восстановлении износостойких металлов с любой степенью свариваемости;
- небольшой расход электроэнергии;
- экологическая безопасность.

Методика исследований. Для исследования структуры и измерения микротвердости поверхностного слоя использовали шлифы образцов листовой стали 65Г (прокат листовой согласно ДСТУ 8540:2015) размером 10x10x6 после ЦЭЭЛ. Легирование происходило на разных режимах на установке с ручным вибратором «Элитрон-52А» в диапазоне энергий разряда (W_p) от 3,9 до 6,8 Дж.

Поверхность шлифа была ориентирована перпендикулярно к поверхности легирования. Перед изготовлением шлифа для исключения краевого эффекта при легировании торец образца фрезеровали на глубину не меньше 2 мм. Для предупреждения смятия слоя, завалов края образец крепили с контртелом в струбцине. Для выявления структуры шлиф подвергался химическому травлению в реактиве.

После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрOMETрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н.

Шероховатость измеряли на приборе профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр» путем снятия и обработки профилограмм.

Перед созданием неразъемного соединения контактирующие поверхности диска и сегмента, заполняют металлополимерным материалом (МППМ).

Результаты исследований. Ниже приводится описание двух способов восстановления и упрочнения дисковых рабочих органов, изготавливаемых из стальных листов и подвергаемых в условиях эксплуатации абразивному износу незакрепленным абразивом, которые включают удаление изношенной части диска и замену ее отдельными сегментами, изготавливаемыми также из стальных листов и соединяемыми с деталью неразъемным соединением.

Отличие способов состоит в различной технологии присоединения сегмента к диску. В первом способе сегменты соединяются с диском по прессовой посадке, а во втором, вставляя шип сегмента в паз диска, после чего, как в первом, так и во втором случае дополнительно фиксируют соединение при помощи

заклепок, винтов или других крепежных элементов. При этом в обоих случаях обеспечивается неразъемное соединение сегмента с диском.

Следует отметить, что диск и присоединяемые к нему сегменты, могут быть изготовлены как из одинаковых, так и различных материалов, проходить при этом термическую обработку и подвергаться дополнительному упрочнению любым известным способом, как отдельно, так и совместно.

Вариант 1 (сегмент с пазом)

Способ, восстановления изношенной поверхности дисковых рабочих органов (рис. 1), изготовленных из листовой стали 65Г, толщиной 6 мм, осуществляется следующим образом. Изношенную поверхность диска (рис. 1, вид В) протачивают как чисто и на лепестках, в зависимости от формы паза в сегменте (рис. 2, а), изготавливают выточки (рис. 2, б).

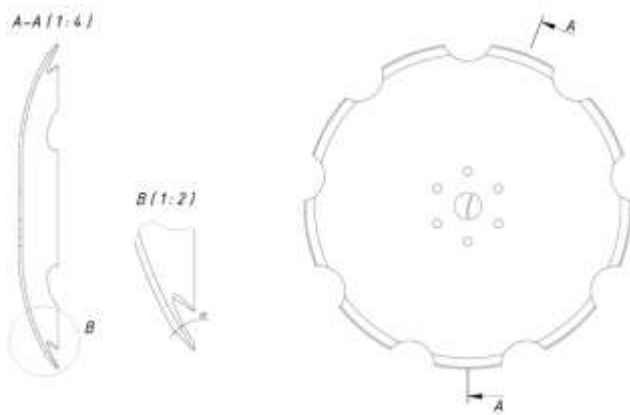


Рисунок 1 - Дисковый рабочий орган, подвергаемый в процессе эксплуатации абразивному износу.

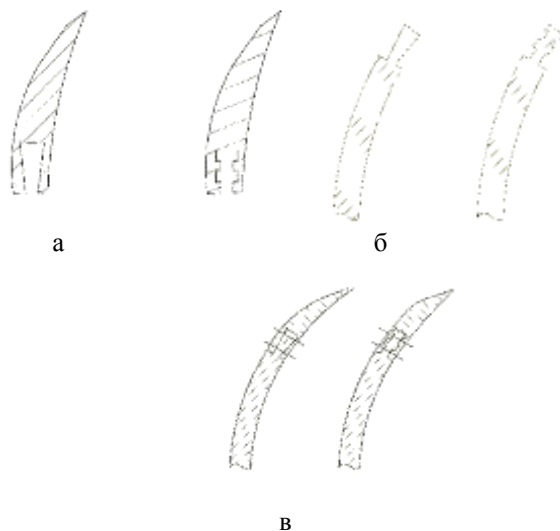


Рисунок 2 - Схема фиксации сегмента на выточке диска: а – формы паза в сегменте, б – формы выточек на диске, в – фиксация сегмента.

Ответная деталь (сегмент), изготавливается в следующей последовательности:

1) на токарном станке из листа толщиной 12 мм и твердостью HRC 25 изготавливают диск с пазом необходимой формы (см. рис. 2, а) и заточками на наружном диаметре по углу α , как у готового изделия (см. рис. 1).

2) диск с пазом разрезают на фрезерном станке на отдельные детали (сегменты), согласно рис. 3

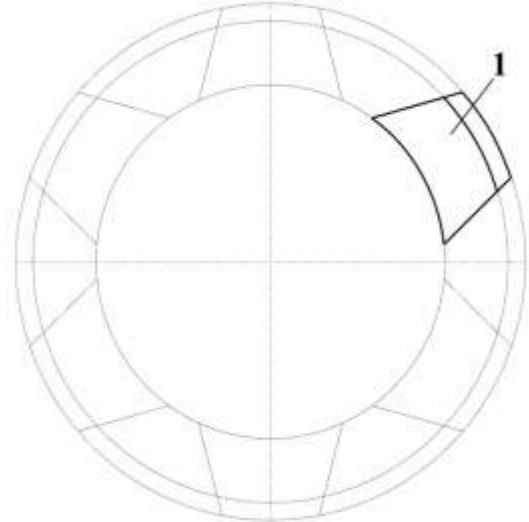


Рисунок 3 - Схема изготовления сегментов: 1 – сегмент.

Монтаж сегментов на диске производят в следующей последовательности:

1) стенки паза разгибают до размера, позволяющего вставить в него выточки на диске и заполняют МПМ;

2) вставляют выточки на диске в паз сегмента и сжимают стенки паза в замок;

3) фиксируют соединение с помощью дополнительных крепежных элементов (рис. 2, в);

4) проводят ЦЭЭЛ боковых стенок паза, имеющих исходную твердость HRC 25 при энергии разряда $W_p = 6,8$ Дж с производительностью $T = 2,0$ см²/мин, повышая при этом твердость до HRC 57.

5) проводят ЦЭЭЛ поверхности сегмента, находящейся ниже боковых стенок паза и выше заточенной поверхности, имеющих исходную твердость HRC 25 при энергии разряда $W_p = 6,8$ Дж с производительностью $T = 0,5$ см²/мин, повышая при этом твердость до HRC 65.

Вариант 2 (сегмент без паза)

Изношенную поверхность диска протачивают как чисто и на лепестках, в зависимости от размеров сегмента, изображенного на рис. 4, а изготавливают сквозные пазы (рис. 4, б).

Сегменты, изготавливает в следующей последовательности:

1) на токарном станке, из листа толщиной 12 мм изготавливают диск с заточками по наружному диаметру и углу α , как у готового изделия (см. рис. 1).

2) диск разрезают на фрезерном станке на отдельные детали (см. рис. 3) из которых, последующей фрезеровкой изготавливают сегменты с шипами, согласно рис. 4, а.

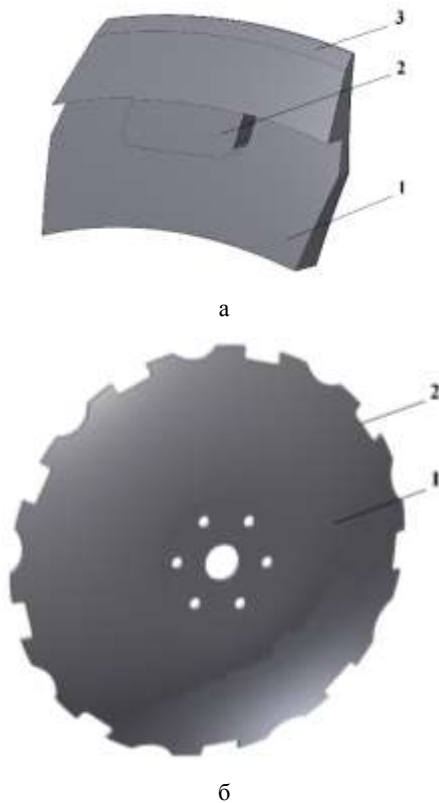


Рисунок 4 - а: 1-сегмент, 2-шип, 3-заточка; б – 1 – диск, 2 – паз под вставки сегментов.

Монтаж сегментов на диске производят в следующей последовательности:

- 1) вставляют шипы сегментов (рис. 4, а) в пазы дисков (рис. 4, б), соединяют поверхности сегмента с поверхностью диска;
- 2) просверливают сквозные отверстия через диск и сегмент;
- 3) вынимают сегмент с диска;
- 4) вставляют шипы на сегментах в пазы дисков и фиксируют соединение заклепками или винтами (рис. 5);

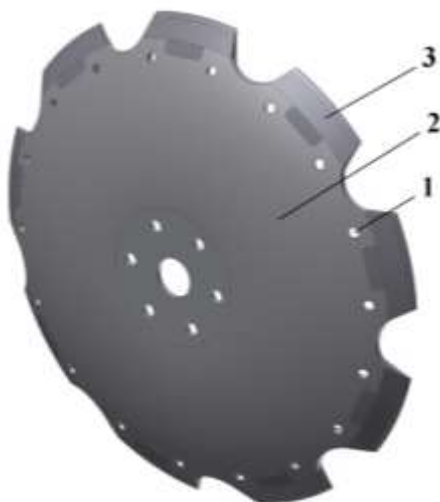


Рисунок 5 - Дисковая борона в сборе: 1 – сквозное отверстие через диск и сегмент, 2 – диск, 3 – сегмент.

5) Проводят ЦЭЭЛ сегмента и прилегающую к нему поверхность диска при энергии разряда $W_p = 6,8$ Дж с производительностью $T = 0,5$ см²/мин, на твердость HRC 55 – 60.

Выводы:

1. Разработаны два экологически безопасных способа восстановления и одновременного упрочнения, изношенных поверхностей дисков почвообрабатывающих машин, изготавливаемых из листового проката (ГОСТ19903-74) стали 65Г.

2. В первом способе неразъемное соединение обеспечивается путем соединения сегментов с диском по прессовой посадке, а во втором, вставляя шип сегмента в паз диска, после чего, как в первом, так и во втором случае дополнительно фиксируют соединение а во втором, вставляя шип сегмента в паз диска, после чего, как в первом, так и во втором случае дополнительно фиксируют при помощи заклепок, винтов или других крепежных элементов. при помощи заклепок, винтов или других крепежных элементов.

3. Диск и присоединяемые к нему сегменты, могут быть изготовлены как из одинаковых, так и различных материалов, проходить термическую обработку и подвергаться дополнительному упрочнению, как отдельно, так и совместно, любым известным экологически безопасным способом).

Список літератури

1. Кожуро Л.М. Технология сельскохозяйственного машиностроения. Минск: БГАТУ, 2005. 414 с.
2. Хрущов М.М., Бабичев М.А. *Абразивное изнашивание*. Москва: Наука, 1970. 252 с.
3. Шовкоплас А.В. Анализ причин изнашивания дисковых рабочих органов и моделей изменения свойств почвы под их действием. *Вестн. науки и образования Северо-запада России. Сер.: Технические науки. Промышленные технологии*. Калининград, 2015. №3, С. 1-8.
4. Шовкоплас А. В. Дисковые рабочие органы борон: технологии изготовления и восстановления. *Лесотехнический журнал. Сер.: Технологии. Машины и оборудование*. 2016. №1. С. 203-211.
5. Сидоров, С.А. Совершенствование конструкции и упрочнение дисковых рабочих органов [Текст] / С.А. Сидоров // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. – М.: 2003. – №8. – С. 30-32.
6. Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В. Пат. 2337796, Российская Федерация. *Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием*. 2008.
7. Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В. Пат. 82948, Украина. *Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням*. 2008.
8. Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Братушак М.П. Пат. 2468899, Российская Федерация. *Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием*. 2012.
9. Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Братушак М.П. Пат. 101715, Украина. *Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням*. 2013.
10. Прудников С.Н., Михальченко А.М. Пат. 92823, Российская Федерация. *Отвал корпуса плуга*. 2010.
11. Михальченко А.М. Пат. 2533957, Российская Федерация. *Способ восстановления и упрочнения отвала корпуса плуга*. 2014.

References (transliterated)

1. Kozhuro L.M. Tehnologija sel'skhozajstvennogo mashinostroenija [Agricultural Engineering Technology]. Minsk, BSATU Publ., 2005. 414p.
2. Hrushhov M.M., Babichev M.A. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 252 p.

3. Shovkopljjas A.V. Analiz prichin iznashivaniya diskovyh rabochih organov i modelej izmeneniya svoystv pochvy pod ih dejstviem [Analysis of the causes of wear of the disk working bodies and models of changes in the properties of the soil under their action] *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-zapada Rossii. Seriya: Tehnicheskie nauki. Promyshlennye tehnologii*. 2015, vol. 1, no. 3, pp.1-8.
4. Shovkopljjas A. V.. Diskovye rabochie organy boron: tehnologii izgotovleniya i vosstanovleniya [Disc working bodies harrows: manufacturing technology and recovery]. *Lesotekhnicheskij zhurnal. Seriya: Tehnologii. Mashiny i oborudovanie*. 2016, no. 1, pp.203-211.
5. Sidorov S.A. Sovershenstvovanie konstrukcii i uprochnenie diskovyh rabochih organov [Improving the design and hardening of disc working bodies]. *Mehanizatsiya i jelektrifikatsiya sel'skogo hozjajstva*. 2003, no.8, pp. 30-32.
6. Marcinkovskij V.S., Tarel'nik V.B., Belous A.V. *Sposob cementatsii stal'nyh detalej jelektrorozionnym legirovaniem* [The method of cementation of steel parts by electroerosive alloying]. Patent RF, no. 2337796, 2008.
7. Marcinkovskij V.S., Tarel'nik V.B., Belous A.V. *Sposib cementatsii stalevih detalej elektroeroziynim leguvannjam* [Method of carburization of steel parts by electro-erosive doping]. Patent UA, no. 82948, 2008.
8. Marcinkovskij V.S., Tarel'nik V.B., Bratushchak M.P. *Sposob cementatsii stal'nyh detalej jelektrorozionnym legirovaniem* [The method of cementation of steel parts by electroerosive alloying]. Patent RF, no. 2468899, 2012.
9. Marcinkovskij V.S., Tarel'nik V.B., Bratushchak M.P. *Sposib cementatsii stalevih detalej elektroeroziynim leguvannjam* [Method of carburization of steel parts by electro-erosive doping]. Patent UA, no. 101715, 2013.
10. Prudnikov S.N., Mihal'chenkov A.M. *Otval korpusa pluga* [Plow body blade]. Patent RF, no. 92823, 2010.
11. Mihal'chenkov A.M. *Sposob vosstanovleniya i uprochneniya otvala korpusa pluga* [Method of restoring and hardening the plow body blade]. Patent RF, no. 2533957, 2014.

Поступила (received) 08.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Тарельник Вячеслав Борисович (Тарельник Вячеслав Борисович, Viacheslav Tarelnyk) – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Технічний сервіс», Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна; тел.: (050) 307-25-72, e-mail: tarelnik@i.ua

Саржанов Богдан Олександрович (Саржанов Богдан Александрович, Bogdan Sarzhanov) – аспірант, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна; тел.: (066) 032-79-00; e-mail: technology@i.ua

А.В. ГАЙДАКА, Г.А. КРУТИКОВ, М.Г. СТРИЖАК

ГІДРОПНЕВМОПРИВОД: ВЧОРА, СЬОГОДНІ, ЗАВТРА

Викладено історію розвитку гідроприводу, як найважливішого засобу механізації і автоматизації виробничих процесів. Відзначено внесок вітчизняних вчених у становлення теорії гідравлічного і пневматичного приводу як науки. Підкреслено провідну роль України в розробці та виробництві елементів і систем гідропневмоприводів. Показані нові тенденції і принципи функціонування мехатронних гідропневмосистем, які забезпечили широкомасштабне впровадження їх в гнучкі автоматизовані виробництва.

Ключові слова: гідропривод, пневмопривод, мехатронні системи, автоматизовані виробництва.

А.В. ГАЙДАКА, Г.А. КРУТИКОВ, М.Г. СТРИЖАК

ГИДРОПНЕВМОПРИВОД: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Изложена история развития гидропривода, как важнейшего средства механизации и автоматизации производственных процессов. Отмечен вклад отечественных ученых в становление теории гидравлического и пневматического привода как науки. Подчеркнута ведущая роль Украины в разработке и производстве элементов и систем гидропневмоприводов. Показаны новые тенденции и принципы функционирования мехатронных гидропневмосистем, которые обеспечили широкомасштабное внедрение их в гибкие автоматизированные производства.

Ключевые слова: гидропривод, пневмопривод, мехатронные системы, автоматизированные производства.

А. ГАЙДАКА, Г. КРУТИКОВ, М. СТРИЖАК

HYDROPNEUMBOX: YESTERDAY, TODAY, TOMORROW

The prerequisites and history of the emergence and development of industrial hydraulic drive as the most important means of mechanization and automation of production processes is outlined. The contribution of domestic scientists in the process of establishing the theory of hydraulic and pneumatic actuator as science is noted. The leading role of Ukraine both in the past and in the post-Soviet space in the development and production of elements and systems of hydro-pneumatic actuators is underlined, the main enterprise-developers and manufacturers of this equipment are listed.

Much attention is paid to the modern stage of development of this industry as an integral part of mechatronic systems. New trends and principles of the functioning of mechatronic hydropneumatic systems are shown, which ensured their large-scale introduction into flexible automated production. Examples of modern elements of mechatronic hydropneumatic systems and schemes of their use in industrial processes are given.

Keywords hydraulic actuator, pneumatic actuator, mechatronic systems, automated productions.

1. Гідропневмопривод. Історія.

Перша промислова революція, пов'язана з винаходом парового двигуна, привела до необхідності створення системи передачі енергії від джерела (парової машини) до виконавчих механізмів металорізальних, ткацьких і інших верстатів. Так з'явилися пристрої, які ми тепер називаємо *приводами*, що являють собою сукупність двигуна (Д) і передаточного механізму (ПМ) (рис. 1). Довгий час застосовували механічні передачі. Наявність в цехах зубчастих, важільних і ремінних передач великої довжини крім громіздкості, низького ККД і поганої керованості призводили до значного травматизму. З прогресом у галузі металургії і технології обробки металів стали змінюватися і погляди на способи передачі енергії від джерела (двигуна) до споживача (виконавчого органа).

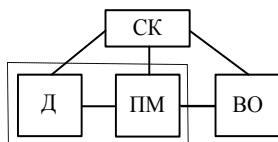


Рисунок 1 – Структурна схема довільної технологічної чи транспортної машини:

Д – двигун; ПМ – передаточний механізм (передача);
ВО – виконавчий орган; СК – система керування

На межі XIX і XX століть стало очевидно, що громіздкі і дуже травмонебезпечні механічні передачі

можна замінити набагато більш ефективними, компактними і безпечними гідравлічними і пневматичними передачами. У гідропневмоприводах енергія від джерела до виконавчих ланок машин передається у вигляді гідравлічної і пневматичної енергії. Гідропневмоприводи дозволяють більш гнучко і ефективно змінювати характер руху виконавчих механізмів тобто плавно безступінчасто регулювати їх швидкість, координати зупинки, зусилля і крутний момент. Вже на зорі появи гідроприводів вони стали поділятися залежно від форми гідравлічної енергії, використовуваної в них, на *гідродинамічні передачі*, де використовується кінетична енергія рідини, і на *об'ємні гідроприводи*, де використовується потенційна енергія стиснення рідини. Об'ємні гідроприводи, в свою чергу, в залежності від способу регулювання швидкості руху вихідної ланки гідродвигуна стали поділятися на приводи з дросельним регулюванням швидкості і приводи з об'ємним (машинним) регулюванням швидкості. Приводам першої групи була властива відкрита циркуляція рідини (наявність маслабака) і для них були характерні стаціонарні умови експлуатації. Приводам другої групи була властива замкнута циркуляція рідини, вони відрізнялися компактністю і набули поширення в мобільних машинах і в літальних апаратах.

З другої половини XIX століття гідравлічний об'ємний привод став знаходити застосування у вантажопідйомних пристроях. Вже в 1882 році компанія Армстронг Уїтворт розробила екскаватор, в якому ковш мав гідравлічний привод. Під час першої

світової війни гідрооб'ємні передачі стали використовуватися в танках, які з'явилися на полях битв. Поява перших гідродинамічних передач в кінці XIX століття пов'язана з бурхливим прогресом в галузі суднобудування. Перший патент на повноцінну гідродинамічну передачу (гідротрансформатор) був отриманий у 1902 році.

Протягом наступного століття прогрес в області вдосконалення конструкцій і поліпшення робочих характеристик гідропневмоприводів був дійсно грандіозним і вражаючим і це забезпечило поширення цих засобів автоматизації практично на всі сфери матеріального виробництва і повсякденного побуту людей. В даний час область їх застосування поширюється від гігантських механізмів будівельних, гірничодобувних і металургійних машин до медичного обладнання та мініатюрних складальних комплексів пристроїв мікроелектроніки.

Величезний внесок у розвиток теорії гідропневмоприводів внесли вітчизняні вчені. Фондатором машинобудівної гідравліки по праву вважається д.т.н., професор Башта Т. М. [1]. Праці видатних учених: Гаминіна Н. С. [2], Єрмакова В. В. [3], Лещенко В. В. [4], Попова Д. Н. [5], Прокоф'єва В. Н. [6], Хохлова В. А. [7] та ін. заклали фундамент вітчизняної школи промислової гідравліки. Сучасна теорія пневмопривода викладена в працях Герц О. В. і Крейнина Г. В. [8]. Одним з видатних учених у галузі гідродинамічних передач був професор, завідувач кафедри гідромашин Харківського політехнічного інституту Алексапольській Д. Я. [9].

Україна була і залишається одним з основних науково-технічних центрів на пострадянському просторі з розробки та виробництва гідромашин і елементів гідропневмоприводів. Основним розробником об'ємних гідромашин і елементів гідропневмоприводів був до 1992 р. головний інститут верстатостроїтельної промисловості України «ВНІІГідропривод» (Харків) (після 1992 р. – НІІГідропривод).

Об'ємні гідромашини та гидроапаратуру в Харкові випускають заводи «Гідропривід», «Будгідравліка» (до 2005 р., зараз ЗАО "Влада-Промтекс"). Гідроапаратуру для аерокосмічних об'єктів виробляє «Машинобудівний завод ФЕД» (Харків). Пневмоустаткування для нафтогазових промислів а також гідропідсилювачі проектувалися і вироблялися на ВО «Теплоавтомат» (Харків). Місто Суми (Україна) було і залишається найбільшим центром насособудування (ПАТ "Сумське НВО", ПАТ "Сумський завод "Насосенергомаш", ТОВ "Сумський машинобудівний завод"). Кропивницький (раніше Кіровоградський) завод ЗАО «Гідросила ГРУП» є великим виробником насосів об'ємної дії і гидроапаратури для мобільних машин. Сімферопольське ВАТ «Пневматика» і ДСКТБ «Пневматика» є найбільшими на пострадянському просторі розробниками і виробниками силової пневмоавтоматики.

Незважаючи на те, що частина цих підприємств в даний час закрита, їх досвід, традиції і науково-

виробничі нароби живі і реалізуються комерційними підприємствами. Так, колишніми співробітниками «ВНІІГідроприводу» утворені й успішно працюють фірма «Промгідропривод» і корпорація «Гідроелекс». Практично вся виробнича програма заводу «Гідропривод», що включає широкую гаму аксіально-поршневих і радіально-поршневих насосів реалізується на фірмі «Харківгазобладнання». Досить широку номенклатуру гідророзподільників і запірно-регулюючої гидроапаратури розробляє і випускає АТ "Гідроапаратура" (Харків). Повний перелік комерційних підприємств з випуску промислової гідравліки і пневматики в Україні та Харківському регіоні можна знайти в роботах [10, 11].

Новий етап у розвитку гідропневмоприводів настав в кінці XX століття і пов'язаний він був з успіхами в області комп'ютерних технологій.

2. Мехатроніка. Сьогодення та майбутнє.

Бурхливий розвиток цифрових технологій привів до створення досить дешевих і компактних засобів керування, що мають практично необмежені функціональні можливості і високу швидкість. Такі пристрої дозволяють реалізувати складні алгоритми керування в реальному масштабі часу, застосовно до високошвидкісних технологічних процесів. Поява на ринку промислових контролерів, керуючих ЕОМ і інших мікропроцесорних засобів керування докорінно змінила сам принцип керування гідравлічними і пневматичними приводами, породивши нову технічну галузь – *мехатроніку*. Необхідно відзначити, що найбільш швидко і ефективно досягненнями в області цифрових технологій скористалися виробники електроприводних засобів автоматизації. Переважне використання на перших порах електроприводу в мехатронних системах, таких як робототехніка, багато в чому пояснювалося успіхами у створенні надійних силових перетворювачів (підсилювачів потужності), нових типів електродвигунів, а також нових принципів керування. Важливу роль зіграла та обставина, що поєднання електронної керуючої частини з силовим електроприводом вимагало менше витрат, ніж поєднання з іншими силовими контурами, що використовують інші фізичні принципи (гідравліка, пневматика). Все це призвело до того, що кількість промислових роботів з електроприводами, яке свого часу не перевищувало 10%, стало неухильно зростати.

Аналогічний симбіоз електроніки з гідравлікою і пневматикою довгий час стримувався відсутністю досить дешевих і надійних перехідних пристроїв (інтерфейсів). Двокаскадні електрогідравлічні підсилювачі потужності, найбільшою мірою придатні для вирішення цього завдання, мають надзвичайно великий коефіцієнт підсилення (більше $3 \cdot 10^5$) і здатні перетворювати електричні сигнали малої потужності в гідравлічні сигнали величезної потужності, але мають один істотний недолік: їх вартість іноді багаторазово перевищує ціну всієї решти мехатронної системи. Однак останнім часом такий стан речей став докорінно змінюватися. У номенклатурі більшості провідних

фірм – виробників гідроустаткування з'явилися гідравлічні пропорційні розподільники і клапани різноманітних типів (рис. 2). Використання в них потужних пропорційних електромагнітів (в тому числі на основі рідкоземельних елементів) дозволило створювати зусилля достатні для прямого переміщення затвора розподільника і перейти до однокаскадних схем підсилювачів, що забезпечило значно більшу надійність, швидкодію та істотне зниження ціни.

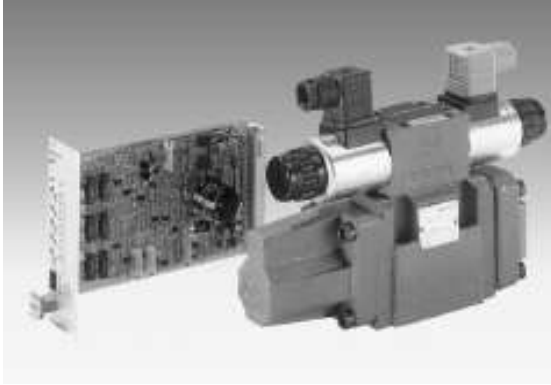


Рисунок 2 – Пропорційний гідророзподільник Bosch Rexroth з електронним блоком керування

Крім того, активно став використовуватися модульний принцип побудови мехатронних систем з гідравлічними і пневматичними силовими контурами. Такий модуль являє собою привід, конструктивно виконаний у вигляді завершеного мехатронного вузла, що включає в себе не тільки двигун з розподільниками, а й датчики, комутаційні лінії, гальмівні пристрої і вбудовані електронні плати. Подібний модуль дозволяє відразу встановлювати його в машину (рис. 3). Крім того, у гідроприводу завжди залишалися його головні конкурентні переваги перед електроприводом: набагато більш висока питома потужність і можливість приводити в рух робочі органи машин безпосередньо без застосування редукторів.

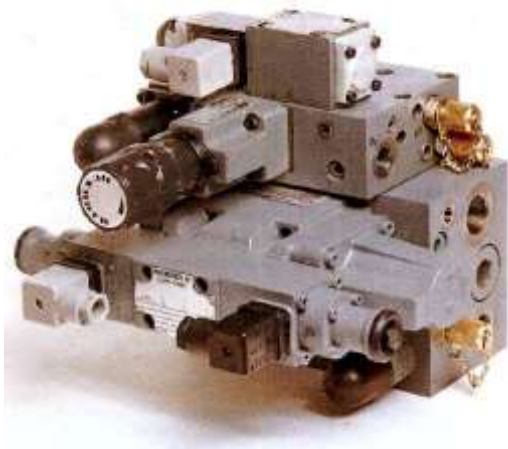


Рисунок 3 – Уніфікований гідравлічний модуль на автоматизованій станочній лінії

Прогрес в області систем керування дозволив

також усунути. і головний недолік пневмопривода – його податливість внаслідок стискання робочого тіла. Застосування сучасних контролерів і міні ЕОМ в контурах керування пневмоприводів дозволяє реалізувати, як уже зазначалося, досить складні алгоритми роботи в реальному масштабі часу. Це призвело до створення нового класу мехатронних систем, в основі якого лежить вільнопрограмований пневмопривод з адаптивним мікропроцесорним керуванням. Такі системи здатні самі переналаштуватися, використовуючи режим самонавчання, відпрацьовуючи внесені до системи збурення, що забезпечує системі високу швидкодію і точність позиціонування. Поява в номенклатурі більшості фірм-виробників пневмоустаткування довгоходових безштокових пневмоциліндрів (рис. 4) поряд з швидкодійною запірно-розподільною апаратурою, що використовує нові композитні матеріали, значно підвищило конкурентоспроможність силової пневматики по відношенню до електроприводу.

Приклад складання трикоординатного модуля на базі безштокових пневмоциліндрів наведено на рис. 5.



Рисунок 4 – Безштоковий пневмоциліндр стрічкового типу («SMC Corporation»)

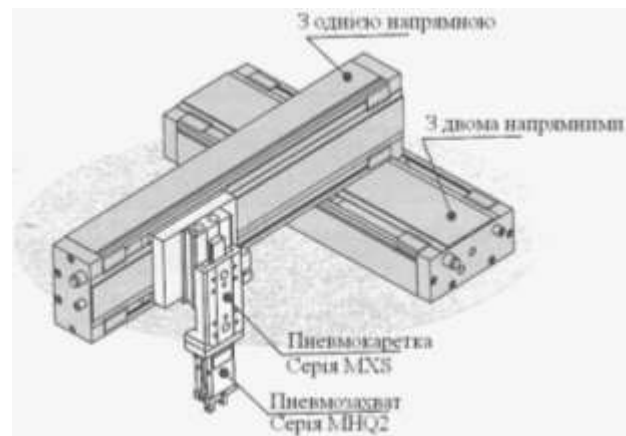


Рисунок 5 – Трикоординатний складальний модуль на базі безштокових пневмоциліндрів

Розроблена й успішно впроваджена концепція пневмоострова, в якому десятки пневморозподільників за допомогою модульного монтажу вбудовані в єдиний компактний комутаційний блок, інтегрований з контролером, керуючим електромагнітами розподільників за заданою технологічним процесом

програмою (рис. 6).



Рисунок 6 – Пневмоострів «Festo» у системі керування технологічним процесом виробництва пластмасових виробів

У зв'язку з дедалі більшим домінуванням цифрових систем керування почали змінюватися як самі принципи керування, так і техніка силових гідропневматичних контурів мехатронних систем. На зміну аналоговому керуванню все частіше приходять дискретні принципи керування (імпульсні, релейні). При такому підході головним завданням для силових контурів стає розробка і впровадження дискретних (релейних) пневматичних і гідравлічних розподільників, що мають високу швидкість і великий ресурс роботи, щоб забезпечити тривалу роботу в умовах високочастотних перемикачів.

Впровадження цих проривних технологій призвело до того, що розрив між технологічним рівнем мехатронних систем з електроприводом і мехатронних гідропневмосистем був ліквідований і використання останніх в гнучких автоматизованих виробництвах стало економічно доцільним. Про це свідчать дані Ганноверського промислового ярмарку [12] (Німеччина). За приростом капіталовкладень в пневматичні засоби автоматизації ця галузь впевнено виходить на перше місце поступово наздоганяючи за обсягом капіталовкладень електропривідні засоби автоматизації [7]. Вважається, що поєднання екологічно чистого та безпечного пневмопривода в якості «м'язів» з мікроелектронікою в якості «мізків» – це один з найбільш перспективних шляхів розвитку мехатронних систем.

Кафедра «Деталі машин і мехатронних систем» НТУ «ХПІ» в рамках спеціалізації «Інженерія мехатронних гідропневмосистем» проводить навчання відповідно до навчальних планів, які містять дисципліни що відповідають сучасним тенденціям і перспективам розвитку мехатронних гідропневмосистем.

Навчальний процес на кафедрі підкріплений науковими дослідженнями перспективних гідравлічних і пневматичних силових контурів мехатронних систем.

Одне з наукових напрямків, очолюване професором кафедри, д.т.н. Крутіковим Г. А. пов'язане з розробкою і дослідженням вільнопрограмованих

пневмоприводів з адаптивним мікропроцесорним керуванням, що використовують режим самонавчання [13, 14]. Крім розробки стратегії і техніки керування такими приводами значний обсяг дослідних робіт пов'язаний з розробкою принципів керування і схем пневмоприводів найбільшою мірою пристосованих для мікропроцесорного керування. Такі приводи забезпечують істотне зниження енерговитрат і розширення області їх використання в бік значного збільшення інерційних навантажень.

У тій же науковій групі під керівництвом доцента, к.т.н. Стрижак М. Г. проводяться розробки і дослідження прецизійних електронно-пневматичних перетворювачів, що дозволяють з високою точністю перетворювати електричні сигнали малої потужності в пропорційний тиск стисненого повітря [15 - 19]. У цьому сенсі розроблені зразки з повною підставою можна вважати ефективним інтерфейсом електропневматичної мехатронної системи.

Науково-дослідницька робота, що проводиться на кафедрі під керівництвом професора д.т.н. Андrenко П. Н. спрямована на підвищення технічного рівня гідророзподільників і контрольно-регулюючої гідроапаратури шляхом вібраційної лінеаризації, а також дослідження і впровадження нових методів технічної діагностики гідропневмоприводів [20–21].

3. Висновок

За всю історію розвитку промислової гідравліки і пневматики було вирішено величезну кількість складних завдань. Низка не менш складних завдань очікує свого рішення попереду. Подальший прогрес в цій галузі залежить від того, наскільки ефективно будуть використані нові досягнення в теорії керування, матеріалознавстві і електроніці. Використання досягнень цифрових комп'ютерних технологій в керуючих контурах гідропневмоприводів - це магістральний напрям в бік істотного підвищення продуктивності праці і створення безлюдних технологій. Саме цими факторами характеризується п'ятий технологічний уклад промислово розвинених держав.

Список літератури

1. Башта Т. М. *Машиностроительная гидравлика*. М. : Машинобудування, 1971. 672 с.
2. Гаминін М. С. *Гидравлический привод систем управления*. М. : Машинобудування, 1972. 376 с.
3. Срмаков В. В. *Гидравлический привод металлорежущих станков*. М. : Машинобудування, 1963. 324 с.
4. Лещенко В. А. *Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением*. М. : Машинобудування, 1975. 288 с.
5. Попов Д. Н. *Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем*: навчальний посібник. М. : Машинобудування, 1987. 464 с.
6. Аксально-поршневой регулируемый привод / Прокоф'єв В. Н. та ін. М. : Машинобудування, 1969, 495 с.
7. *Электрогидравлический следящий привод* / під ред. В. О. Хохлова. М. : Машинобудування, 1971. 432 с.
8. Герц, О. В., Крейнін Г. В. *Расчет пневмоприводов*. Довідник. М. : Машинобудування, 1975. 272 с.
9. Алексапольский Д. Я. *Гидродинамические передачи*. М. : Машгиз, 1963. 271 с.
10. Аврунін Г. А., Лур'є З. Я., Андrenко П. М., Лещенко І. Г. *Состояние промышленной гидравлики и пневматики в*

- Харьковском регионе. *Промислова гідравліка і пневматика*. Вінниця : ВДАУ, 2008, №8 (27), с. 5-11.
11. А. И. Кудрявцев, А. А. Кудрявцев. *Пневматические системы и устройства в промышленности* : довідник. Х. : Формат, 2011. 480 с.
 12. Hannover Messe (Ганноверський промисловий ярмарок), 23.04.2018-27.04.2018 р. <https://www.fwaware.org/event/hannover-messe-2018/> [електронний ресурс].
 13. Крутіков Г. А., Атаманов Ю. Л., Стрижак М. Г. *Теория и проектирование пневматических силовых контуров мехатронных систем*: монографія. Х. : НТУ «ХПИ», 2019. 300 с.
 14. Крутіков Г. А. *Проектирование многопозиционного свободнопрограммируемого пневмопривода с адаптивным микропроцессорным управлением*: навчальний посібник. ХПГУ : 2000. 97 с.
 15. Стрижак М. Г. *Обгрунтування структури і параметрів електропневматичних перетворювачів пневмоагрегатів технологічного устаткування*: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.17 «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати». Харків, 2013. 20 с.
 16. Крутіков Г. А., Стрижак М. Г. Дослідження роботи редукційного клапана з пропорційним електрокеруванням в системі шліфувально – обдирної машини. *Вісник НТУ «ХПИ»: Технології в машинобудуванні*. Х. : НТУ "ХПИ", 2010, №25, с. 33-40.
 17. Крутіков Г. А., Стрижак М. Г. Оптимізація конструктивних параметрів мехатронних перетворювачів. *Промислова гідравліка і пневматика*, 2012, № 1, с. 59-63.
 18. Крутіков Г. А., Стрижак М. Г. Определение области рационального использования электропневматического преобразователя. *Вестник НТУ "ХПИ" : Новые решения в современных технологиях*. Х. : НТУ "ХПИ", 2012, № 66 (972), с. 41-46.
 19. Крутіков Г. А., Стрижак М. Г. Определение областей устойчивости аналогового электропневматического преобразователя в пространстве его конструктивных параметров. *Вестник НТУ "ХПИ" : Новые решения в современных технологиях*. Х. : НТУ "ХПИ", 2012, № 9, с. 16-21.
 20. Андренко П. М. *Гідравлічні пристрої мехатронних систем*: навчальний посібник. Х. : НТУ «ХПИ», 2014. 188 с.
 21. Андренко П. М., Дмитрієнко О. В., Свинаренко М. С. *Надійність, технічне діагностування та експлуатація гідропневмоприводів*: навчальний посібник. Х. : НТУ «ХПИ», 2018, 520 с.
 9. Aleksapol'skij D. Ja. *Gidrodinamicheskie peredachi* [Hydrodynamic transmission]. Moscow, Mashinobuduvannya Publ., 1963. 271 p.
 10. Avrunin G. A., Lur'e Z. Ja., Andrenko P. M., Leshchenko I. G. Sostojanie promyshlennoj gidravliki i pnevmatiki v Har'kovskom regione [The state of industrial hydraulics and pneumatics in the Kharkov region]. *Promislova gidravlika i pnevmatika* [Industrial hydraulics and pneumatics]. Vinnicja : VDAU Publ., 2008, no. 8 (27), pp. 5-11.
 11. A. I. Kudrjavcev, A. A. Kudrjavcev. *Pnevmaticheskie sistemy i ustrojstva v promyshlennosti* [Pneumatic systems and devices in industry]. Kharkiv, Format Publ., 2011. 480 p.
 12. Hannover Messe (Hannover Industrial Fair), 23.04.2018-27.04.2018 year. <https://www.fwaware.org/event/hannover-messe-2018/> [electronic resource]. (Accessed 23.05.2019).
 13. Krutikov G. A., Atamanov Ju. L., Strizhak M. G. *Teoriya i proektirovanie pnevmaticheskikh silovykh konturov mehatronnykh sistem* [Theory and design of pneumatic power circuits of mechatronic systems]. Kharkiv, NTU «HPI» Publ., 2019. 300 p.
 14. Krutikov G. A. *Proektirovane mnogopozicionnogo svobodnoprogrammiruemogo pnevmoprivoda s adaptivnym mikroprocessornym upravleniem* [Designed multi-position freely programmable pneumatic actuator with adaptive microprocessor control]. Kharkiv, NTU «HPI» Publ., 2000. 97 p.
 15. Stryzhak M. G. *Obhruntuvannya struktury i parametriv elektropnevmatychnykh peretvoryuvachiv pnevmoahrehativ tekhnolohichnoho ustatkuvannya: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.05.17 «Hidravlichni mashyny ta hidropnevmoahrehaty»* [Justification of structure and parameters of electropneumatic converters of pneumatic aggregates of technological equipment. Abstract of a thesis candidate eng. sci. diss. (Ph. D.) 05.05.17 "Hydraulic machines and hydro-pneumatic units"]. Kharkiv, 2013. 20 p.
 16. Krutikov G. A., Stryzhak M. G. Doslidzhennya roboty reduktsiynoho klapanu z proporsiyonym elektrokeruvanniam v systemi shlifoval'no – obdyrnoyi mashyny [Investigation of the operation of the reduction valve with proportional electrocutation in the grinding and grinding machine system]. *Visnyk NTU «KhPI»: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni* [Bulletin of the NTU "KhPI". Technology in mechanical engineering]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2010, no. 25, pp. 33-40.
 17. Krutikov G. A., Stryzhak M. G. Optymizatsiya konstruktyvnykh parametriv mehatronnykh peretvoryuvachiv [Optimization of structural parameters of mechatronic transducers]. *Promislova hidravlika i pnevmatika* [Industrial hydraulics and pneumatics]. Vinnicja : VDAU Publ., 2012, no. 1, p. 59-63.
 18. Krutikov G. A., Strizhak M. G. Opredelenie oblasti racional'nogo ispol'zovaniya jelektropnevmaticheskogo preobrazovatelja [Determination of the area of rational use of the electro-pneumatic converter]. *Vestnik NTU "KhPI" : Novye resheniya v sovremennykh tehnologijah* [Bulletin of the NTU "KhPI". New solutions in modern technology]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2012, № 66 (972), pp. 41-46.
 19. Krutikov G. A., Strizhak M. G. Opredelenie oblastej ustojchivosti analogovogo jelektropnevmaticheskogo preobrazovatelja v prostranstve ego konstruktivnykh parametrov [Determination of the stability regions of the analog electropneumatic converter in the space of its constructive parameters]. *Vestnik NTU "KhPI" : Novye resheniya v sovremennykh tehnologijah* [Bulletin of the NTU "KhPI". New solutions in modern technology]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2012, № 9, pp. 16-21.
 20. Andrenko P. M. *Hidravlichni prystroji mehatronnykh system* [Hydraulic devices of mechatronic systems]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2014. 188 p.
 21. Andrenko P. M., Dmitriyenko O. V., Svinarenko M. S. *Nadiynist', tekhnichne diahnostuvannya ta ekspluatatsiya hidropnevmooprivodiv* [Reliability, technical diagnostics and operation of hydropneumatic drives]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2018, 520 p.

Поступила (received) 15.03.2019

References (transliterated)

1. Bashta T. M. *Mashinostroitel'naya gidravlika* [Engineering hydraulics]. Moscow, Mashinobuduvannya Publ., 1971. 672 p.
2. Gaminin M. S. *Gidravlicheskiy privod sistem upravleniya* [Hydraulic actuator of control systems]. Moscow, Mashinobuduvannya Publ., 1972. 376 p.
3. Ermakov V. V. *Gidravlicheskiy privod metallorezhushchikh stankov* [Hydraulic actuator of machine tools]. Moscow, Mashinobuduvannya Publ., 1963. 324 p.
4. Leshchenko V. A. *Gidravlicheskie sledyashchie privody stankov s programmym upravleniem* [Hydraulic servo drive with a computer-controlled machine tools]. Moscow, Mashinobuduvannya Publ., 1975. 288 p.
5. Popov D. N. *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem* [Dynamics and regulation of hydraulic and pneumatic systems]. Moscow, Mashinobuduvannya Publ., 1987. 464 p.
6. Prokof'ev V. N. et al. *Aksial'no-porshnevoj reguliruemyy privod* [Axial piston variable drive]. Moscow, Mashinobuduvannya Publ., 1969, 495 p.
7. Hohlov V. O. *Elektrohidravlicheskiy sledjashhij privod* [Electrohydraulic servo actuator]. Moscow, Mashinobuduvannya Publ., 1971. 432 p.
8. Gerts. O. V., Krejnin G. V. *Raschet pnevmoprivodov* [Calculation of pneumatic actuators]. Moscow, Mashinobuduvannya Publ., 1975. 272 p.

Гайдамака Анатолій Володимирович (Гайдамака Анатолий Владимирович, Anatolij Gaydamaka) – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Деталі машин та мехатронних систем» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 066-510-21-80, gaydamaka.doc@gmail.com

Крутіков Геннадій Анатолійович (Крутиков Геннадий Анатоліевич, Gennady Krutikov) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Деталі машин та мехатронних систем» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 050-512-63-35, gkrutikov@gmail.com

Стрижак Мар'яна Георгіївна (Стрижак Марьяна Георгиевна, Mariana Strijak) – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Деталі машин та мехатронних систем» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 063-471-38-21, marjanastryzhak@gmail.com

В.И. ПОЛЯНСКИЙ**ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ С КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТКИ**

Аналитически определены параметры теплового процесса глубинного шлифования, включая температуру резания, глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, градиент температуры, и установлены основные условия их уменьшения с целью повышения качества и производительности обработки. Показано, что при глубинном шлифовании температура резания больше, чем при многопроходном шлифовании. Однако доля возникающего при глубинном шлифовании тепла, уходящего в образующиеся стружки, больше, чем при многопроходном шлифовании. Соответственно, в поверхностный слой обрабатываемой детали уходит меньше тепла, что способствует повышению качеству обрабатываемых поверхностей. Установлено, что при глубинном шлифовании градиент температуры также меньше, чем при многопроходном шлифовании. Это дополнительно указывает на возможность повышения качества обработки при глубинном шлифовании, несмотря на то, что глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали в этом случае больше, чем при многопроходном шлифовании. Проведено сравнение теоретических решений и экспериментальных данных применительно к операциям зубошлифования по методам профильного копирования и обката, осуществляемых соответственно с применением методов глубинного и многопроходного шлифования. В результате установлено, что при зубошлифовании по методу профильного копирования производительность может быть увеличена до 5 раз по сравнению с зубошлифованием по методу обката при обеспечении бездефектной обработки. Это свидетельствует, во-первых, о достоверности полученных теоретических решений, во-вторых, о возможности практического использования значительных технологических возможностей глубинного шлифования.

Ключевые слова: глубинное шлифование, зубошлифование, тепловой процесс, температура резания, градиент температуры, качество обработки, производительность обработки.

В.І. ПОЛЯНСЬКИЙ**ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕСУ ПРИ ГЛИБИННОМУ ШЛІФУВАННІ З ЯКІСТЮ ОБРОБКИ**

Аналітично визначено параметри теплового процесу глибинного шліфування, включаючи температуру різання, глибину проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі, градієнт температури, та встановлено основні умови їх зменшення з метою підвищення якості та продуктивності обробки. Показано, що при глибинному шліфуванні температура різання більше, ніж при багатопрохідному шліфуванні. Однак частка тепла, що виникає при глибинному шліфуванні, та переходить в стружки, що утворюються, більше, ніж при багато-прохідному шліфуванні. Відповідно, в поверхневий шар оброблюваної деталі йде менше тепла, що сприяє підвищенню якості оброблених поверхонь. Встановлено, що при глибинному шліфуванні градієнт температури також менше, ніж при багатопрохідному шліфуванні. Це додатково вказує на можливість підвищення якості обробки при глибинному шліфуванні, незважаючи на те, що глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі в цьому випадку більше, ніж при багатопрохідному шліфуванні. Проведено порівняння теоретичних рішень і експериментальних даних стосовно операцій зубошліфування за методами профільного копіювання та обкатування, що здійснюються відповідно із застосуванням методів глибинного й багатопрохідного шліфування. В результаті встановлено, що при зубошліфуванні за методом профільного копіювання продуктивність може бути збільшена до 5 разів порівняно із зубошліфуванням за методом обкатування за умови забезпечення бездефектної обробки. Це свідчить, по-перше, про достовірність отриманих теоретичних рішень, по-друге, про можливість практичного використання значних технологічних можливостей глибинного шліфування.

Ключові слова: глибинне шліфування, зубошліфування, тепловий процес, температура різання, градієнт температури, якість обробки, продуктивність обробки.

V. POLYANSKY**INTERRELATION OF HEAT PROCESS PARAMETERS DURING DEPTH GRINDING WITH TREATMENT QUALITY**

The parameters of the thermal process of deep grinding, including the temperature of cutting, the depth of heat penetration into the surface layer of the workpiece, the temperature gradient, are determined analytically, and the main conditions for their reduction with the aim of improving the quality and productivity of processing are established. It is shown that with deep grinding the cutting temperature is higher than with multi-pass grinding. However, the proportion of heat generated during deep grinding, which goes into the formed chips, is greater than with multipass grinding. Accordingly, in the surface layer of the workpiece takes less heat, which contributes to improving the quality of the processed surfaces. It has been established that during deep grinding the temperature gradient is also smaller than with multipass grinding. This additionally indicates the possibility of improving the quality of processing during deep grinding, despite the fact that the depth of heat penetration into the surface layer of the workpiece, in this case, is greater than with multi-pass grinding. A comparison of theoretical solutions and experimental data with respect to gear grinding operations according to the methods of specialized copying and rolling, carried out, respectively, using the methods of deep and multipass grinding. As a result, it was established that during gear grinding by the method of profile copying, the productivity can be increased up to 5 times in comparison with grinding by the rolling method while ensuring defect-free processing. This testifies, firstly, about the reliability of the obtained theoretical solutions, and secondly, about the possibility of practical use of significant technological capabilities of deep grinding.

Keywords: deep grinding, gear grinding, thermal process, cutting temperature, temperature gradient, quality of processing, processing performance.

Введение. В настоящее время на операциях шлифования все шире используется метод глубинного шлифования, обеспечивающий повышение производительности и бездефектную высококачественную обработку деталей машин. Этому способствует широкое применение на практике высококористых абразивных кругов, обладающих

высокой режущей способностью, как при многопроходном, так и при глубинном шлифовании. В связи с этим появилась возможность осуществлять высокопроизводительное глубинное шлифование взамен обычного многопроходного шлифования без ухудшения качества обработанных поверхностей, в особенности деталей, изготовленных из материалов с

повышенными физико-механическими свойствами. Например, вместо операций зубошлифования по методу обката используются операции зубошлифования по методу профилевого копирования на современных зубошлифовальных станках с ЧПУ зарубежного производства. Это позволяет повысить производительность и качество обработки. Вместе с тем, применение глубинного шлифования связано с увеличением температуры резания и поэтому при неправильно выбранном режиме резания возможно образование на обрабатываемой поверхности температурных дефектов, что снижает качество обработки. Учитывая сказанное, при выборе оптимальных условий глубинного шлифования необходимо строго учитывать температурный фактор, не допуская образования на обрабатываемых поверхностях температурных дефектов. Для этого необходимо знать закономерности формирования параметров теплового процесса при глубинном шлифовании, включая температуру резания, глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, градиент температуры и другие параметры. Настоящая работа направлена на математическое представление указанных параметров шлифования и установление их взаимосвязи с качеством обрабатываемых поверхностей для выбора оптимальных условий высокопроизводительного и высококачественного глубинного шлифования.

2. Анализ последних исследований и публикаций.

В научно-технической литературе проблеме глубинного шлифования уделено достаточно большое внимание, главным образом из-за повышенной температуры резания и определения эффективных условий ее уменьшения [1–3]. Разработаны математические модели формирования температуры резания при глубинном шлифовании и методики расчета оптимальных параметров режима резания, приведены примеры практического применения разработанных технологических процессов высокопроизводительного глубинного шлифования [4, 5]. Однако в полной мере не проведен теоретический анализ условий уменьшения температуры резания и управления параметрами теплового процесса при глубинном шлифовании для обеспечения высокопроизводительной и высококачественной обработки деталей машин. Фактически отсутствуют относительно простые инженерные методики расчета оптимальных параметров режима шлифования, характеристик круга и других параметров глубинного шлифования с учетом ограничения по температурному критерию и обеспечения условий повышения производительности обработки. Это не позволяет научно обоснованно подойти к максимальному использованию на практике имеющихся значительных технологических возможностей глубинного шлифования с точки зрения повышения качества и производительности обработки.

3. Цель исследования. Определение условий повышения качества и производительности обработки при глубинном шлифовании на основе установления

взаимосвязи параметров теплового процесса с качеством обрабатываемых поверхностей.

4. Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи следует воспользоваться приведенным в работе [6] дифференциальным уравнением для определения температуры резания θ при шлифовании:

$$c \cdot \rho \cdot V_{рез} \cdot \theta + \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho}{\sigma \cdot V_{рез}} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \sigma \cdot V_{рез} \cdot \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град); τ – время обработки, с; σ – условное напряжение резания, Н/м²; $V_{рез} = V_{дет} \cdot \sqrt{t/2R_{кр}}$ – скорость перемещения теплового источника вглубь поверхностного слоя обрабатываемого материала, м/с; t – глубина шлифования, м; $V_{дет}$ – скорость детали, м/с; $R_{кр}$ – радиус круга, м.

Его решение:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau}{\lambda}} \quad \text{или} \quad (2)$$

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot Q_{y\delta} \cdot \sqrt{\frac{t}{2R_{кр}}}}{\lambda}}, \quad (3)$$

где $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальная температура резания, град; $Q_{y\delta} = V_{дет} \cdot t$ – удельная производительность обработки, м²/с.

Дифференциальное уравнение (1) получено на основе расчетной схемы параметров теплового процесса при шлифовании (рис. 1) с учетом представления снимаемого припуска в виде пакета элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые в процессе шлифования перерезаются шлифовальным кругом.

Оставшаяся после перерезания часть элементарного стержня длиной l_2 определяет глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, и, как установлено в работе [7], аналитически описывается зависимостью:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}} \quad (4)$$

Как видно, чем больше время τ , тем на большую глубину возникающее при шлифовании тепло проникает в поверхностный слой обрабатываемой детали. В табл. 1 приведены рассчитанные на основе уравнения (2) значения времени обработки τ , а на основе уравнения (3) значения глубины шлифования t и скорости детали $V_{дет}$ для заданной удельной производительности обработки $Q_{y\delta} = V_{дет} \cdot t$ с изменением θ/θ_{max} в пределах 0 ... 1.

Таблица 1 – Расчетные значения параметров теплового процесса при шлифовании

θ / θ_{max}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$e^{\theta / \theta_{max}}$	1	1,2214	1,491	1,822	2,225	2,4596	2,718
$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$	1	0,9771	0,895	0,728	0,445	0,2459	0
$\frac{V_{рез}^2 \cdot \tau}{a}$	0	0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	∞
τ, c	0	0,0264	0,145	0,422	1,069	1,848	∞
$Q_{y\delta} = 1000 \text{ мм}^2/\text{мин}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0696	2,11	17,84	114,0	341,5	∞
$V_{дем}, \text{ м/мин}$	∞	14,37	0,47	0,056	0,009	0,003	0
N_1 / N	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
N_2 / N	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0
$Q_{y\delta} = 2000 \text{ мм}^2/\text{мин}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0174	0,527	4,46	28,5	85,375	∞
$V_{дем}, \text{ м/мин}$	∞	115,0	3,8	0,45	0,07	0,023	0
$Q_{y\delta} = 4000 \text{ мм}^2/\text{мин}$							
$t, \text{ мм}$	0	0,0043	0,131	1,115	7,125	21,343	∞
$V_{дем}, \text{ м/мин}$	∞	919,5	30,35	3,6	0,56	0,19	0

Исходные данные для расчета при шлифовании стали ШХ15: $V_{рез} = 3,33 \cdot 10^{-3}$ м/с; коэффициент температуропроводности стали ШХ15 – $a = \lambda / (c \cdot \rho) = 8,4 \cdot 10^{-6}$ м²/с; радиус круга $R_{кр} = 0,2$ м.

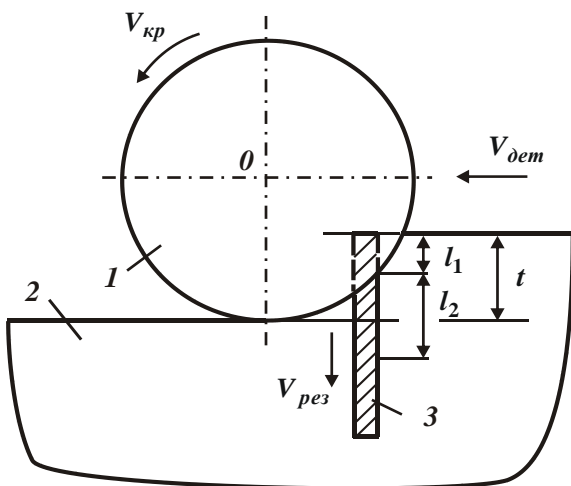


Рисунок 1 – Расчетная схема температуры резания при плоском шлифовании с учетом перерезания кругом адиабатических стержней, набором которых представлен снимаемый припуск: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень (l_1 – длина срезанной части адиабатического стержня; $V_{кр}$ – скорость круга)

Из табл. 1 следует, что с увеличением отношения θ / θ_{max} , т.е. с увеличением температуры резания θ при заданной удельной производительности обработки $Q_{y\delta}$, глубина шлифования t увеличивается, а скорость детали $V_{дем}$, наоборот, пропорционально уменьшается. Следовательно, с увеличением температуры резания θ появляется возможность реализовать условия глубинного шлифования. Чем больше удельная производительность обработки $Q_{y\delta}$, тем больше глубина шлифования t . Так, при $Q_{y\delta} = 4000 \text{ мм}^2/\text{мин}$ можно реализовать глубину шлифования $t = 21,343$ мм с приемлемым для практики значением $V_{дем} = 0,19$ м/мин. Увеличение глубины шлифования t до значения, превышающего значение $t = 21,343$ мм, по сути, предполагает переход от шлифования к процессу резки материалов, осуществляемого с весьма малой скоростью детали и с большой глубиной шлифования. Дифференциальное уравнение (1) можно представить:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} + \frac{\lambda}{\sigma \cdot V_{рез}^2} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = 1. \quad (5)$$

Первое слагаемое уравнения (5), как показано в работе [6], определяет долю выделяемого при шлифовании тепла, уходящего в образуемые стружки, а второе слагаемое определяет долю тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали. Из этого вытекает, что с увеличением отношения θ / θ_{max}

, соответствующего увеличению глубины шлифования t при условии $Q_{y\partial} = const$ (табл. 1), увеличивается доля тепла, уходящего в образующиеся стружки, и соответственно уменьшается доля тепла, уходящего в поверхностный слой обрабатываемой детали. При условии $\theta/\theta_{max} \rightarrow 1$ фактически все выделяющееся при шлифовании тепло уходит в образующиеся стружки, а в обрабатываемую деталь уходит весьма малая часть тепла. Это, собственно, и предопределяет возможность повышения качества обработки с точки зрения исключения температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях в условиях высокопроизводительного глубинного шлифования. Следовательно, эффективность глубинного шлифования состоит в том, что основная часть тепла уносится из зоны резания образующимися стружками, а это снижает тепловую напряженность поверхностного слоя обрабатываемой детали и повышает качество обработки.

Если уравнение (5) умножить на мощность резания $N = \sigma \cdot Q$ (где $Q = B \cdot Q_{y\partial}$ – производительность обработки, м³/с; B – ширина шлифования, м):

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot N + \frac{\lambda}{\sigma \cdot V_{рез}^2} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \cdot N = N, \quad (6)$$

то первое слагаемое уравнения (6) определяет мощность резания N_1 , затрачиваемую на нагревание образующихся стружек, а второе слагаемое определяет мощность резания N_2 , затрачиваемую на нагревание поверхностного слоя обрабатываемой детали.

В табл. 1 приведены расчетные значения отношений N_1/N и N_2/N для различных значений отношения θ/θ_{max} , полученных на основе уравнения (6) для условий $Q = const$ и $\sigma = const$, соответственно $N = const$.

Как видно, с увеличением отношения θ/θ_{max} имеет место увеличение отношения N_1/N и уменьшение отношения N_2/N , т.е. увеличивается мощность резания N_1 , затрачиваемая на нагревание образующихся стружек, и уменьшается мощность резания N_2 , затрачиваемая на нагревание поверхностного слоя обрабатываемой детали. Это является дополнительным подтверждением того, что с увеличением глубины шлифования (переходом в область глубинного шлифования) при условии $Q = const$ в поверхностный слой обрабатываемой детали уходит меньше тепла, чем в образующиеся стружки, а это способствует повышению качества обрабатываемой поверхности.

Данный вывод подтверждается многочисленными экспериментальными данными, приведенными в научно-технической литературе [1, 3, 7], согласно которым при глубинном шлифовании качество обрабатываемых поверхностей повышается, что позволяет совместить предварительное и

окончательное шлифование в одну операцию с обеспечением высоких показателей производительности и качества обработки. При этом параметр l_2 , описываемый зависимостью (4), с учетом отношения $\tau = l/V_{дем} = t \cdot \sqrt{2t \cdot R_{кр}} / Q_{y\partial}$ принимает вид:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{t \cdot \sqrt{2t \cdot R_{кр}}}{Q_{y\partial}}}, \quad (7)$$

где $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$ – длина контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м.

Как видно, с увеличением глубины шлифования t , что соответствует увеличению температуры резания θ (табл. 1), параметр l_2 увеличивается. К такому же выводу можно прийти, анализируя известную аналитическую зависимость [7]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (8)$$

где $q = \sigma \cdot V_{рез}$ – плотность теплового потока, Вт/м².

Разрешая зависимость (8) относительно параметра l_2 , имеем:

$$l_2 = \frac{\lambda \cdot \theta}{\sigma \cdot V_{рез}} = \frac{\theta}{\theta_{max}} \cdot \frac{a}{Q_{y\partial}} \cdot \sqrt{2t \cdot R_{кр}}. \quad (9)$$

Как следует из зависимости (9), параметр l_2 для заданных значений θ/θ_{max} , $Q_{y\partial}$, a , $R_{кр}$ зависит лишь от глубины шлифования t : с ее увеличением параметр l_2 увеличивается.

Учитывая, что длина контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью равна $l = \sqrt{2t \cdot R_{кр}}$, можно заключить, что параметр l_2 зависит лишь от l : чем больше l , тем больше l_2 . Очевидно, в условиях глубинного шлифования параметр l_2 больше, чем в условиях многопроходного шлифования, поскольку больше длина l контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью. Поэтому при глубинном шлифовании параметр l_2 больше, чем при многопроходном шлифовании.

Однако градиент температуры, исходя из зависимости (8):

$$\frac{\theta}{l_2} = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{Q_{y\partial}}{\sqrt{2t \cdot R_{кр}}}, \quad (10)$$

при глубинном шлифовании меньше, чем при многопроходном шлифовании. Это также указывает на возможность снижения тепловой напряженности поверхностного слоя обрабатываемой детали при глубинном шлифовании (по сравнению с многопроходным шлифованием) и повышения качества обработки.

Основным условием уменьшения градиента температуры, согласно зависимости (10), является

уменьшение условного напряжения резания σ путем применения шлифовальных кругов, обладающих повышенной режущей способностью (высокопористых, импрегнированных, прерывистых, алмазных кругов и т.д.). Уменьшая условное напряжение резания σ и увеличивая глубину шлифования t , можно добиться повышения удельной производительности обработки $Q_{y\delta}$ при заданном значении градиента температуры θ/l_2 , т.е. при заданном качестве обрабатываемой поверхности.

Полученные теоретические результаты использованы для совершенствования операции зубошлифования, осуществляемой по методу профильного копирования на современном зубошлифовальном станке зарубежного производства, т.е. по методу глубинного шлифования. Для этого съем всего припуска величиной 0,4 мм производился за один проход круга (т.е. с глубиной шлифования $t=0,4$ мм) со скоростью его перемещения вдоль зуба $V_{\text{дем}} = 3$ м/мин. В результате была реализована удельная производительность обработки $Q_{y\delta} = 1200$ мм²/мин [8].

При зубошлифовании по методу обката съем припуска величиной 0,4 мм производился за 5 проходов круга со скоростью его перемещения вдоль зуба $V_{\text{дем}} = 8$ м/мин с глубиной шлифования $t=0,08$ мм. Соответственно, $Q_{y\delta} = 680$ мм²/мин.

Как видно, удельная производительность обработки при зубошлифовании по методу профильного копирования, т.е. в условиях глубинного шлифования, в 2 раза больше, чем при зубошлифовании по методу обката, т.е. при многопроходном шлифовании.

Кроме того, при глубинном шлифовании за счет уменьшения количества проходов круга уменьшилось в 2 раза вспомогательное время, затрачивание на реверсирование круга. Следовательно, фактическая производительность обработки при зубошлифовании по методу профильного копирования, как установлено на практике, увеличилась до 5 раз по сравнению с зубошлифованием по методу обката. При этом обеспечены высокие показатели обработки – на обрабатываемых поверхностях отсутствовали прижоги, микротрещины и другие температурные дефекты.

Выводы. Проведен теоретический анализ закономерностей изменения параметров теплового процесса глубинного шлифования, включая температуру резания, глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, градиент температуры, и определены основные условия их уменьшения с целью повышения качества и производительности обработки. Аналитически установлено, что при глубинном шлифовании температура резания больше, чем при многопроходном шлифовании. Однако доля возникающего при глубинном шлифовании тепла, уходящего в образующиеся стружки, больше, чем при многопроходном шлифовании. Соответственно, в

поверхностный слой обрабатываемой детали уходит меньше тепла, что способствует повышению качества обрабатываемых поверхностей. Показано, что при глубинном шлифовании градиент температуры также меньше, чем при многопроходном шлифовании. Это дополнительно указывает на возможность повышения качества обработки при глубинном шлифовании, несмотря на то, что глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали в этом случае больше, чем при многопроходном шлифовании. Проведено сравнение теоретических решений и экспериментальных данных применительно к операциям зубошлифования по методам профильного копирования и обката, осуществляемых соответственно с применением методов глубинного и многопроходного шлифования. В результате установлено, что при зубошлифовании по методу профильного копирования производительность может быть увеличена до 5 раз по сравнению с зубошлифованием по методу обката при обеспечении бездефектной обработки. Это свидетельствует, во-первых, о достоверности полученных теоретических решений, во-вторых, о возможности практического использования значительных технологических возможностей глубинного шлифования.

Список литературы

1. Якимов А. В. *Прерывистое шлифование*. – Киев–Одесса : Изд. объедин. "Вища школа", 1986. – 175 с.
2. Силин С. С., Хрульков В. А., Лобанов А. В., Рыкунов Н. С. *Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов*. – Москва : Машиностроение, 1984. – 62 с.
3. Werner G. *Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen*. – "Werkstattstechnik", 1979. – Nr. 10. – s. 613–620.
4. *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения* / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. – Одесса : ОНПУ, 2002. – Т. 1. "Механика резания материалов". – 580 с.
5. Лавриненко В. И., Солод В. Ю. *Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки* : монография. – Каменское : ДГТУ, 2016. – 529 с.
6. Полянский В.И. *Расчет температуры шлифования с учетом баланса тепла, уходящего в стружки и обрабатываемую деталь* // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 13 / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – С. 51-59.
7. Якимов А. В., Новиков Ф. В., Новиков Г. В., Серов Б. С., Якимов А. А. *Теоретические основы резания и шлифования материалов* : учебное пособие. – Одесса : ОГПУ, 1999. – 450 с.
8. Нежебовський В. В. *Технологічне забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шпінних конвеєрів на операціях зубошліфування* : автореф. дис. ... канд. техн. наук за спеціальністю 05.02.08 "Технологія машинобудування". – Одеса : ОНПУ, 2011. – 21 с.

References (transliterated)

1. Yakimov A. V. *Preryvistoye shlifovaniye* [Intermittent grinding]. – Kiyev–Odessa : Izd. ob"yed. "Vishcha shkola", 1986. 175 p.
2. Silin S. S., Khrul'kov V. A., Lobanov A. V. and Rykunov N. S. *Glubimnoye shlifovaniye detaley iz trudnoobrabatyvayemykh materialov* [Deep grinding of parts from hard-to-machine materials]. – Moscow: Mechanical Engineering, 1984. 62 p.

3. Werner G. *Technologische und Konstruktive Voraussetzungen für das Tiefschleifen* / Werner G. "Werkstattstechnik", 1979. No. 10. pp. 613–620.
4. *Physical and mathematical theory of materials processing processes and engineering technology* [Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya] / Under the general editorship of F. V. Novikov and A. V. Yakimov. In ten volumes. - Odessa: ONPU, 2002. Vol. 1. "Mechanics of cutting materials." ["Mekhanika rezaniya materialov"] 580 p.
5. Lavrinenko V. I. and Solod V. Yu. *Instrumenty iz sverkhтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки* : monografiya [Tools from superhard materials in technologies of abrasive and physico-technical processing: monograph]. – Kamenskoye : DGTU, 2016. 529 p.
6. Polyansky V.Y. *Raschet temperatury shlyfovaniya s uchetom balansa tepla, ukhodyashcheho v struzhky u obrabatyvaemuyu detal'* [Calculation of the temperature of grinding taking into account the balance of heat going into chips and the processed part] *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni* [Modern technologies in mechanical engineering]: zb. nauk. prats'. – Vyp. 13 / redkol.: V. O. Fedorovych (holova) [ta in.]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. pp. 51-59.
7. Yakimov A. V., Novikov F. V., Novikov G. V., Serov B. S. and Yakimov A. A. *Teoreticheskiye osnovy rezaniya i shlyfovaniya materialov : uchebnoye posobiye* [Theoretical Foundations of Cutting and Grinding of Materials: study guide]. Odessa : OGPU, 1999. 450 p.
8. Nezhebovs'kyy V. V. *Tekhnolohichne zabezpechennya yakosti obrobky zubchastykh kolis pryvodiv shakhtnykh konveyeriv na operatsiyakh zuboshlyfovannya* [Technological maintenance of the quality of machining of gears of drives of mine conveyors on operations of the grinding] : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk za spetsial'nisty 05.02.08 "Tekhnolohiya mashynobuduvannya". Odesa : ONPU, 2011. 21 p.

Поступила (received) 05.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Vladimir Polyansky) – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ "Імперія металів", м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com.

О.С. КОВАЛЕВСЬКА, С.В. КОВАЛЕВСЬКИЙ

МОДЕЛІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕХАНІЗМІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

Представлено обґрунтування можливості моделювання об'єктів на основі сигнатур, які являють собою образ механізму паралельної структури у вигляді спектра власних коливань структурно пов'язаних актуаторів і виконавчих ланок. Показано, що динамічні властивості стрижневих конструкцій, що описують об'єкти з кінцевим числом ступенів свободи і змінним розподілом навантажень на них, можуть бути представлені рівняннями, які є частотними рівняннями власних коливань системи механізмів паралельної структури. На основі якісного аналізу точності і адекватності ідентифікаційних динамічних моделей і застосування математичного апарату нейронних мереж зроблено висновок про перевагу оцінки його ідентифікаційних моделей в порівнянні з їх точністю. Представлені результати експериментальних досліджень сигнатур окремих конфігурацій механізмів паралельної конфігурації.

Ключові слова: моделювання, ідентифікація, динаміка конструкцій, адекватність моделей, точність моделей, нейронні мережі, сигнатура, механізми паралельної структури.

Е.С. КОВАЛЕВСКАЯ, С.В. КОВАЛЕВСКИЙ

МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Представлено обоснование возможности моделирования объектов на основе сигнатур, которые представляют собой образ механизма параллельной структуры в виде спектра собственных колебаний структурно связанных актуаторов и исполнительных звеньев. Показано, что динамические свойства стержневых конструкций, описывающих объекты с конечным числом степеней свободы и переменным распределением нагрузок на них, могут быть представлены уравнениями, которые являются частотными уравнениями собственных колебаний системы механизмов параллельной структуры. На основе качественного анализа точности и адекватности идентификационных динамических моделей и применения математического аппарата нейронных сетей сделан вывод о предпочтительности оценки адекватности идентификационных моделей в сравнении с их точностью. Представлены результаты экспериментальных исследований сигнатур отдельных конфигураций механизмов параллельной конфигурации.

Ключевые слова: моделирование, идентификация, динамика конструкций, адекватность моделей, точность моделей, нейронные сети, сигнатура, механизмы параллельной структуры.

О. KOVALEVSKA, S. KOVALEVSKYY

MODELS OF IDENTIFICATION OF PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS

The substantiation of the possibility of modeling objects based on signatures, which represent the image of the mechanism of a parallel structure in the form of the natural oscillation spectrum of structurally connected actuators and executive links, is presented. It is shown that the dynamic properties of rod structures describing objects with a finite number of degrees of freedom and variable load distributions on them can be represented by equations that are frequency equations of natural oscillations of a system of mechanisms of a parallel structure. Based on a qualitative analysis of the accuracy and adequacy of identification dynamic models and the use of the mathematical apparatus of neural networks, it was concluded that it is preferable to assess the adequacy of identification models in comparison with their accuracy. The results of experimental studies of the signatures of some configurations of the mechanisms of the parallel configuration are presented.

Keywords: modeling, identification, structural dynamics, model adequacy, model accuracy, neural networks, signature, mechanisms of parallel structure.

Вступ. Верстатне обладнання з механізмами паралельної структури (МСП) здатне вирішити широке коло завдань підвищення продуктивності і ефективності і є перспективним напрямком в підвищенні гнучкості виробництва. Таке обладнання відрізняється жорсткістю конструкції при достатній точності переміщень робочих органів з малою металоємністю, здатністю до мобільності, високим рівнем комп'ютеризації [1]. Особливість верстатів з МСП, засобів і методів формування деталей машин, зокрема, розташування ланок МСП зменшує величину переміщення верстатних мас, що сприяє зниженню енергетичних показників, а передача формотворчих рухів платформи, яка несе виконавчі органи верстата за допомогою актуаторів, збільшує точність позиціонування інструменту. Механізми паралельної структури і створене на їх основі верстатне обладнання здатні забезпечити широке коло завдань. Тому, кардинальне вдосконалення виробничих технологій веде до створення комплексно автоматизованих верстатних систем на базі механічних, електронних, програмних синергетично інтегрованих в єдине ціле.

Ідентифікація об'єктів являє собою задачу, рішення якої актуалізується в системах оптимального управління цими об'єктами. Тому вимоги до таких моделей регламентуються їх відповідністю критеріям достовірності і точності цілям застосування [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. На основі таких моделей можуть створюватися еталонні моделі, які використовуються системами автоматизованого управління для коригуючого впливу на об'єкт управління [**Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Створенню ідентифікаційних моделей засновано на виборі і обґрунтуванні інформаційного джерела з подальшим формуванням масиву прецедентів. Від їх обсягу та якості залежить достовірність ідентифікаційної моделі об'єкта.

Однією з особливостей такий ідентифікації об'єктів є твердження про залежність реакції об'єкта від складності збурюючого впливу на цей об'єкт. Суть цього твердження полягає в тому, що обсяг інформації про індивідуальні властивості об'єкта є пропорційний складності функції збурюючого впливу і може бути ідентифікований в функції відклику на цей вплив

[**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] З теорії автоматичного управління відомо, що ступінчасті впливу як аналог одиничних, дозволяють виявляти передавальні характеристики ланок динамічних моделей об'єктів. Цей приклад дозволяє припускати, що власні коливання об'єкта і його елементів містять інформацію про визначальну множину його властивостей і характеристик.

Мета роботи. Теоретичне та експериментальне обґрунтування можливості динамічної ідентифікації МСП, включаючи їх виконавчі ланки на основі спектрів власних коливань, тобто, обґрунтування і підтвердження доцільності ідентифікації об'єктів на основі хвильових сигнатур власних коливань.

Основна частина. Під сигнатурою сигналів власних коливань МПС слід розуміти амплітудно-частотну характеристику певного стану об'єкта. Таким чином, кожному ідентифікованому стану об'єкта повинна відповідати певна сигнатура: сукупність таких сигнатур здатне описувати відповідну множину станів об'єкта:

$$\begin{aligned} &1\text{-й стан об'єкта} - S1(t); \\ &2\text{-й стан об'єкта} - S2(t); \\ &\dots \dots \dots \\ &n\text{-й стан об'єкта} - Sn(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Оскільки технічні і технологічні об'єкти можуть бути описані сукупністю матеріальних, енергетичних та інформаційних складових, то саме сигнатури об'єктів, що мають хвильовий характер, містять найбільш повний обсяг інформації про об'єкт.

Проблема динамічної ідентифікації об'єктів полягає в розробці математичного апарату моделювання, який би володів можливостями, що забезпечують необхідні характеристики точності $d(t)$ і адекватності $A(t)$ динамічної моделі. Цій проблемі присвячено багато робіт [6,7,8,9,10,11]. Однак, проблема актуальності прецедентів потребує подальшого обговорення і додаткових дослідженнях [12,13,14].

Для аналізу стрижневий конструкції МПС прийнято наступне:

- безперервний розподіл маси замінено дискретним точковим розподілом мас;
- конструкція МПС розглядається як система з кінцевим числом ступенів свободи.

Таким чином, в обох випадках стрижнева конструкція МПС розглядаються як системи з кінцевим числом ступенів свободи, що складаються з пружного безмасового скелета конструкції і приєднаних до нього дискретних мас. Розрахункові схеми окремих стрижневих конструкцій МПС як систем з кінцевим числом ступенів свободи засновані на описі положення мас при коливаннях конструкції, які описуються лінійними і кутовими переміщеннями. Під дією прикладеної до стрижневий конструкції періодичного навантаження $H(t)$ вона здійснює коливання. Конструкція розглядається як система з кінцевим числом ступенів свободи (рис.1).

Беручи число незалежних переміщень

стрижневий конструкції МПС як n , число лінійних переміщень – m , прийнято число кутових переміщень – $(n - m)$. Тоді, лінійні переміщення: y_1, \dots, y_m , а α кутові переміщення: $\varphi_{m+1}, \dots, \varphi_n$.

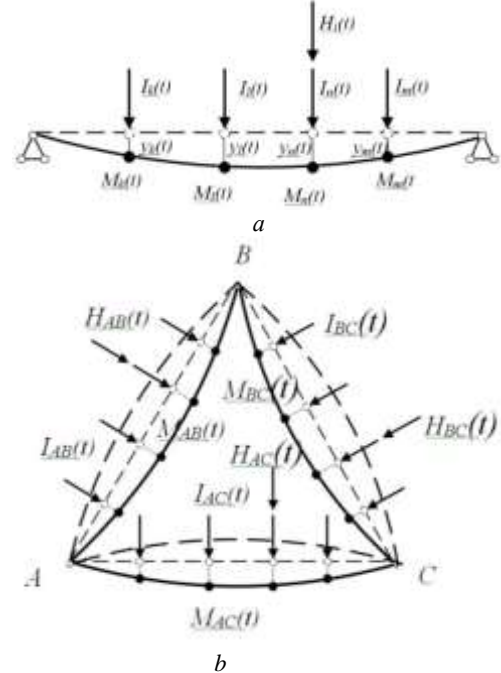


Рисунок 1 – Схеми навантажень елементів ланок стрижневих конструкцій МПС: *a* – загальна схема на прикладі окремої ланки МСП; *b* – схема навантажень базової конфігурації МСП

Початкові умови зміщення мас описуються наступною системою:

$$y_1(t) = y_{01}, \dots, y_m(t) = y_{0m}$$

$$\varphi_{m+1}(t) = \varphi_{0m+1}, \dots, \varphi_n(t) = \varphi_{0n}$$

Початкові швидкості цих зсувів:

$$y_1(0) = y_{01}, \dots, y_m(0) = y_{0m}$$

$$\varphi_{m+1}(0) = \varphi_{0m+1}, \dots, \varphi_n(0) = \varphi_{0n}$$

Динамічні переміщення $y_j(t)$ мас m_j при коливаннях системи з кінцевим числом ступенів свободи відносно їх положення рівноваги викликають реакції R_j , які залежать від діючих сил $H_i(t)$, податливостей δ_j і відповідають рівнянням:

$$R_j(y_1, \dots, y_n, H_i(t)) = -(r_{j1}y_1 + \dots + r_{jn}y_n + R_{jH_i(t)});$$

$$(j = 1, \dots, n);$$

$$m_j \ddot{y}_j = -(r_{j1}y_1 + \dots + r_{j1}y_1 + R_{jH_i(t)});$$

$$(j = 1, \dots, n);$$

$$y_j = \delta_{j1}I_1(t) + \dots + \delta_{jn}I_n(t) + \Delta_{jH_i(t)};$$

$$(j = 1, \dots, n);$$

$$I_j(t) = -m_j \ddot{y}_j;$$

$$\delta_{j1}m_1\ddot{y}_1 + \dots + \delta_{jn}m_n\ddot{y}_1 + y_j = \Delta_{jH_i(t)}; \\ (j = 1, \dots, n).$$

Виходячи з цих форм записи переміщень елементів МПС і їх реакцій побудовані системи рівнянь, що описують коливання елементів МПС у вигляді підсистеми лінійних і кутових переміщень.

$$m_k\ddot{y}_k = -(\sum_{i=1}^m r_{ki}y_i + \sum_{j=m+1}^n r_{kj}\varphi_j); \\ I_k\ddot{\varphi}_k = -(\sum_{i=1}^m r_{li}y_i + \sum_{j=m+1}^n r_{lj}\varphi_j); \\ (k = 1, \dots, m; \quad l = m + 1, \dots, n).$$

Спираючись на рівняння вільних коливань у вигляді:

$$y_k = a_k \sin(\omega t + \beta); \\ \varphi_l = a_l \sin(\omega t + \beta), \\ (k = 1, \dots, m; \quad l = m + 1, \dots, n).$$

де: a_k, a_l - амплітуди вільних коливань системи; ω - кругова частота коливань системи, отримана система рівнянь, що дозволяє визначити невідомі амплітуди МПС згідно [17]:

$$(r_{11} - m_1\omega^2)a_1 + \dots + r_{1m}a_m + r_{1m+1}a_{m+1} + \dots + r_{1n}a_n = 0;$$

.....;

$$r_{m1}a_1 + \dots + (r_{mm} - m_m\omega^2)a_m + r_{mm+1}a_{m+1} + \dots + r_{mn}a_n = 0;$$

$$r_{m11}a_1 + \dots + r_{m+1m}a_m (r_{m+1m+1} - I_{m+1}\omega^2)a_{m+1} + \dots + r_{m+1n}a_n = 0;$$

.....;

$$r_{n1}a_1 + \dots + r_{nm}a_m + r_{nm+1}a_{m+1} + \dots (r_{nn} - I_n\omega^2)a_n = 0.$$

Аналогічно отримана система диференціальних рівнянь:

$$\sum_{i=1}^m \delta_{ki}m_i\ddot{y}_i + \sum_{j=m+1}^n \delta_{kj}I_j\ddot{\varphi}_j + y_k = 0; \\ \sum_{i=1}^m \delta_{li}m_i\ddot{y}_i + \sum_{j=m+1}^n \delta_{lj}I_j\ddot{\varphi}_j + \varphi_l = 0;$$

$$(k = 1, \dots, m; \quad l = m + 1, \dots, n).$$

Отримана система рівнянь також складається з двох взаємопов'язаних підсистем. Перша підсистема диференціальних рівнянь описує лінійні переміщення мас ($k = 1, \dots, m$), друга - кутові переміщення мас ($l = m + 1, \dots, n$) при вільних коливаннях конструкції.

У матричній формі ця система диференціальних рівнянь має вигляд:

$$[\delta][a]\ddot{q} + \dot{q} = 0;$$

$$[\delta] = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \dots & \delta_{1m} & \delta_{1m+1} & \dots & \delta_{1n} \\ \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{m1} & \dots & \delta_{mm} & \delta_{mm+1} & \dots & \delta_{mn} \\ \delta_{m+11} & \dots & \delta_{m+1m} & \delta_{m+1m+1} & \dots & \delta_{m+1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \delta_{n1} & \dots & \delta_{nm} & \delta_{nm+1} & \dots & \delta_{nn} \end{pmatrix},$$

де $[\delta]$ - матриця податливості конструкції МПС.

Оскільки матриця жорсткості конструкції МПС безпосередньо пов'язана з матрицею податливості її ланок, при розкритті отримано рівняння:

$$b_n(\omega^2) + b_{n-1}(\omega^2)^{n-1} + \dots + b_1\omega^2 + b_0 = 0 \quad (2)$$

Це рівняння є частотним рівнянням власних коливань системи. Оскільки положення системи, від якого відраховуються переміщення, що виникають при коливаннях, є становищем стійкої рівноваги, то все коріння цього рівняння є дійсними і позитивними [17]. Цим доводиться, що будь-яка кожна система з кінцевим числом ступенів свободи має свій спектр власних частот, за яким може ідентифікуватися положення або траєкторія руху ланок МПК. З цього висновку доводиться, що рішеннями рівняння є спектр власних коливань стрижневої конструкції верстату з МПК.

Доведено існування дійсних розв'язань рівняння (3) для різних конфігурацій верстатів та іншого обладнання з МСП дозволяє вважати, що сигнатури власних коливань такого обладнання є носіями інформації для побудови ідентифікаційних моделей об'єктів. В якості таких моделей може виступати нейронна мережа. Вибір нейронної мережі як багатовимірної математичної моделі системи рівнянь регресії обумовлений її властивістю цілісності.

Точність моделювання, зазвичай, знаходиться в прямій залежності від часу моделювання:

$$d(t) = D \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}\right), \quad (3)$$

де t - час, необхідний для одноразового створення моделі, α - показник інтенсивності досягнення точності математичної моделі; D - коефіцієнт точності динамічної моделі.

Однак, адекватність моделі, в загальному випадку, з часом знижується:

$$A(t) = A_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta_1}}\right) - A_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta_2}}\right), \quad (4)$$

де β_1 і β_2 - показники інтенсивності забезпечення адекватності моделі; A_1 и A_2 - коефіцієнти адекватності динамічної моделі.

Загальний характер зміни в часі показників $d(t)$ і $A(t)$ показано на рис.2.

Можна припустити, що в кращому випадку і коректність та відповідність моделі повинні прагнути до максимального значення. Однак, про кількісну оцінку можна судити тільки в тому випадку, якщо ці оцінки мають обґрунтовані числові значення при наступних вихідних даних:

$$S(t) = k_1 \cdot A(t) + k_2 \cdot d(t) \rightarrow \max, \quad (5)$$

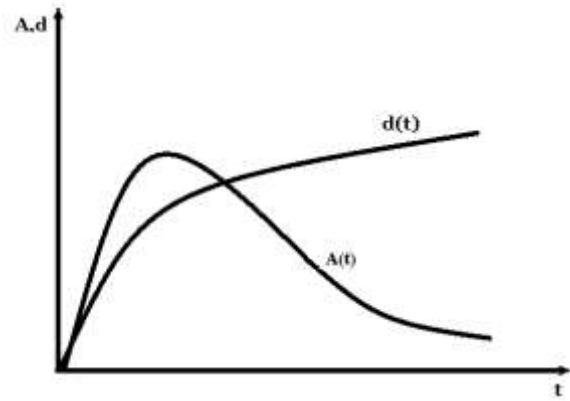


Рисунок 2 – Загальний характер зміни в часі показників $d(t)$ і $A(t)$

при обмеженнях:

$$D = 1; A_1 = 1; A_2 = 1; \alpha = 2; \beta_1 = 2; \beta_2 = 1.$$

де: $S(t)$ – цільова функція оптимізації достовірності динамічної моделі; k_1 і k_2 – параметри цільової функції.

Формування комплексного показника $S(t)$ наведено на рис.2.

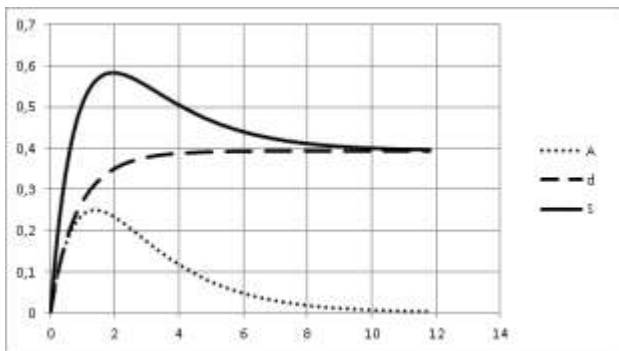


Рисунок 3 – Формування комплексного показника $S(t)$ при вихідних даних: $D = 1; A_1 = 1; A_2 = 1; \alpha = 2; \beta_1 = 2; \beta_2 = 1$

Аналітичний вираз для максимального значення $S(t)$:

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0. \tag{6}$$

З умови (6) випливає, що для динамічних моделей необхідно забезпечувати умови поновлення моделей, при яких:

$$S(t) = k_1 \cdot A_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta_1}}\right) - k_1 \cdot A_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta_2}}\right) + k_2 \cdot D \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}\right) \tag{7}$$

Знайдені чисельні рішення дозволили створити базу прецедентів для нейромережевої моделі (табл.1).

Таблиця 1 – Значення максимуму $S(t)$ для нейросетевого моделювання

D	A ₁	A ₂	α	β_1	β_2	k ₁	k ₂	S (t) _{max}
1	2	2	2	2	1,5	1	1	2,9
2	2	2	2	2	1,5	1	1	3,7
3	2	2	2	2	1,5	1	1	4,8
1	1	2	2	2	1,5	1	1	6,8
2	1,5	2	2	2	1,5	1	1	5,8
1	1,5	2	2	2	1,5	1	1	4,8
3	1,5	2	2	2	1,5	1	1	5,8
1	1,5	2	1	2	1,5	1	1	4,8
2	1,5	2	1	2	1,5	1	1	4,8
0,5	1,5	2	1	2	1,5	1	1	3,8
0,5	1,5	1,5	1	2	1,5	1	1	2,5
0,5	1,5	1,5	1	2	1	1	1	1,7
1	1,5	1,5	1	2	1	1	1	1,9
2	1,5	1,5	1	2	1	1	1	2,2
3	1,5	1,5	1	2	1	1	1	2,5
3	1,5	1,5	1	3	1	1	1	2,5
3	1,5	1,5	1,5	3	1	1	1	2,5
3	1,5	1,5	2	3	1	1	1	2,5
2	1,5	1,5	2	3	1	1	1	2,3
2	1,5	1,5	2	2	1	1	1	2,2
2	1,5	1,5	2	3	1	1	1	2,3
1	1,5	1,5	2	3	1	1	1	2
3	1,5	1,5	2	3	1	1	1	2,5
3	1,5	1,5	2	3	2	1	1	5,8
3	1,5	1,5	0,5	3	2	1	1	4,8
3	1	1,5	0,5	3	2	1	1	6,8

Для створеної нейросетевий моделі вербальне опис, виконане в середовищі NeuroPro 0,25 [15,16] має наступний вигляд:

Поля бази даних (исходные симптомы):

- D
- A₁
- A₂
- α
- β_2

Поля бази даних (кінцеві синдроми): S_{max}

Передобробка вхідних полів БД для подачі мережі:

- $D = (D - 1,75) / 1,25$
- $A_1 = (A_1 - 1,5) / 0,5$
- $A_2 = (A_2 - 1,75) / 0,25$
- $a = (\alpha - 1,25) / 0,75$
- $b_2 = (\beta_2 - 1,5) / 0,5$

Функціональні перетворювачі:

Сигмоїда $1(A) = A / (0,1 + |A|)$

Синдроми 1-го рівня:

Синдром1_1 = Сигмоїда1(0,009517628 * D - 0,05518812 * A1 + 0,005194922 * b2);

Синдром1_2 = Сигмоїда1(0,612629 * D - 0,517355 * A1 + 0,6975336 * A2 - 0,1852509 * a - 0,1394655)

Синдром1_3 = Сигмоїда1(-D + A2 - 0,8100481)

$$\text{Синдром1_4} = \text{Сигмоїда1}(0,06461254 * a + 0,145597 * b_2 - 0,08538858)$$

Кінцеві синдроми:

$$S_{max} = \text{Синдром1_1} + 0,4465326 * \text{Синдром1_2} + 0,07499535 * \text{Синдром1_3} + \text{Синдром1_4} + 0,3638409$$

Постобробка кінцевих синдромів:

$$S_{max} = ((S_{max} * 5,10000014305115) + 8,50000023841858) / 2$$

Отримана значимість входів відображає внесок кожної змінної в сумарний показник якості динамічної моделі:

$$D = 0,6566159$$

$$A_1 = 0,2404453$$

$$A_2 = 1$$

$$\alpha = 0,3158262$$

$$\beta_2 = 0,4155805$$

Таким чином, умова (6) та рівняння (5) дозволяють виконувати оцінку ідентифікаційних моделей, ранжуючи їх щодо умов максимальної ефективності метода і дозволить розширити діапазон оцінки методів створення динамічних моделей об'єктів в процесі їх реалізації.

Для ілюстрації запропонованого методу створення ідентифікаційних моделей наведемо такий приклад. Є МПС у вигляді тріглайда. (рис. 4).

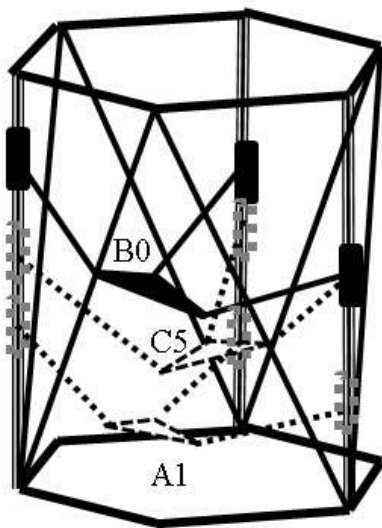


Рисунок 4 – Тріглайд з трьома позиціями виконавчої ланки: A1, B0 і C5

Для експериментальних досліджень прийняті такі позиції:

-позиція B0: {52, -30, 5},

-позиція C5: {0, -60, 250},

-позиція A1: {-52, -30, 50}.

Відповідно до запропонованого методу ідентифікації об'єкта «Тріглайд» експериментально отримані сигнатури цих позицій (рис.5).

Таким чином показано, що сигнатури різних конфігурацій МПС дозволяють ідентифікувати об'єкт у явному вигляді.

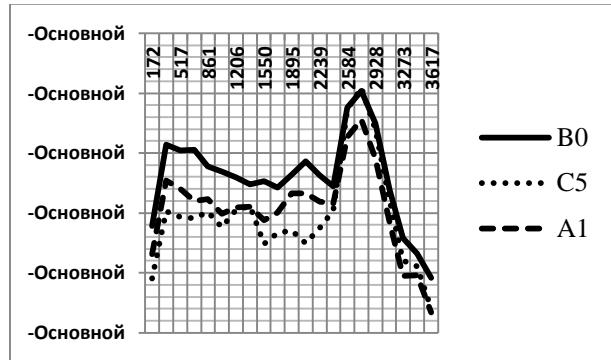


Рисунок 5 – Приклади сигнатур МПС

Висновки. Надано обґрунтування можливості моделювання об'єктів на основі сигнатур, які представляють собою образ механізму паралельної структури у вигляді спектра власних коливань структурно пов'язаних актуаторів і виконавчих ланок. Показано, що динамічні властивості стрижневих конструкцій, що описують об'єкти з кінцевим числом ступенів свободи і змінним розподілами навантажень на них, можуть бути представлені рівняннями, які є частотними рівняннями власних коливань системи механізмів паралельної структури. На основі якісного аналізу точності і адекватності ідентифікаційних динамічних моделей і застосування математичного апарату нейронних мереж зроблено висновок про перевагу оцінки його ідентифікаційних моделей в порівнянні з їх точністю. Представлений підхід дозволяє забезпечити порівняльний аналіз ідентифікаційних моделей, що побудовані на сукупності сигнатур. Результати експериментальних досліджень підтверджують ці висновки

Список литературы

1. Кузнецов Ю.М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні *Проблеми фізико-математичної і технічної освіти і науки України в контексті євроінтеграції*. Київ НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2007. с.45-55.
2. Томашевський В.М. *Моделювання систем* Київ. Видавнична група BHV, 2007. – 352 с.
3. Жиленков А. А. Моделирование адаптивного управления в сложных распределенных системах с идентификацией параметров. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2013. №6. С. 253-260.
4. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. Grey Wolf Optimizer In *Advances in Engineering Software*. 2014. Vol. 69. P. 46-61. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
5. Куликов С.И., Ризванов Ф.Ф., Романчук В.А., Ковалевский С.В. – М.: Машиностроение, 1983. – 135 с.
6. Duvenaud, D., J. R. Lloyd, R. Grosse, J. B. Tenenbaum, and Z. Ghahramani (2013, June). Structure Discovery in Nonparametric Regression through Compositional Kernel Search. In *Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning*, pp. 1166–1174.
7. Giannakis, G., M. Pichler, G. Kontes, H. Schranzhofer, and D. Rovas (2013). Simulation speedup techniques for computationally demanding tasks. In *Proceedings of the Building Simulation 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, pp. 3761–3768.
8. Maimon, O. and L. Rokach (2005). *Data mining and knowledge discovery handbook*, Volume 2. Springer. ISBN: 9780387098227. Mezi'c, I. (2005). Spectral properties of dynamical systems, model reduction and decompositions. *Nonlinear Dynamics* 41 (1-3), 309–325.

9. Safarzadegan Gilan, S., N. Goyal, and B. Dilkina (2016). Active Learning in Multi-objective Evolutionary Algorithms for Sustainable Building Design. In *Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 589–596. ACM.
10. Symonds, P., J. Taylor, Z. Chalabi, A. Mavrogianni, M. Davies, I. Hamilton, S. Vardoulakis, C. Heaviside, and H. Macintyre (2016). Development of an England-wide indoor overheating and air pollution model using artificial neural networks. *Journal of Building Performance Simulation*, 1–14.
11. Соколов В.И. Определение передаточных функций электрогидравлического следящего привода оборудования для обработки давлением. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. 2011. № 1 (155). Ч.1. С. 130–135.
12. Соколова Я.В. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. 2010. № 10(152). С. 168–175.
13. Ковалевский С. В. Развитие методов акустической диагностики в машиностроении: монография Краматорск : ДГМА, 2014. 91 с.
14. Kovalevskii S. V. 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.
15. Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування (з використанням нейронного підходу) : монографія / С.В. Ковалевський, О.С. Ковалевська, Є.О. Коржов, А.О. Кошевой ; за заг. ред. д.т.н., проф. С.В. Ковалевського. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – 186 с.
16. Kovalevska O. S. Application of acoustic analysis in control systems of robotic machine tools / O. S. Kovalevska, S. V. Kovalevskyy // Науковий журнал «Радиоелектроніка, інформатика, управління», «Radio Electronics, Computer Science, Control». – 2018. – № 2 (45). – С. 51–59.
17. Строительная механика : учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-70 02 01 и слушателей ИПК УО «ПГУ» специальностей 1-70 02 71, 1-70 04 71. В 3 ч. Ч. 3. Основы динамики и устойчивости сооружений / сост. и общ. ред. Л. С. Туршечева. – Новополюк : ПГУ, 2010. – 136 с.
- Ghahramani (2013, June). Structure Discovery in Nonparametric Regression through Compositional Kernel Search. In *Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning*, pp. 1166–1174.
7. Giannakis, G., M. Pichler, G. Kontes, H. Schranzhofer, and D. Rovas (2013). Simulation speedup techniques for computationally demanding tasks. In *Proceedings of the Building Simulation 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, pp. 3761–3768.
8. Maimon, O. and L. Rokach (2005). *Data mining and knowledge discovery handbook*, Volume 2. Springer. ISBN: 9780387098227.
- Mezi'c, I. (2005). Spectral properties of dynamical systems, model reduction and decompositions. *Nonlinear Dynamics* 41 (1-3), 309–325.
9. Safarzadegan Gilan, S., N. Goyal, and B. Dilkina (2016). Active Learning in Multi-objective Evolutionary Algorithms for Sustainable Building Design. In *Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 589–596. ACM.
10. Symonds, P., J. Taylor, Z. Chalabi, A. Mavrogianni, M. Davies, I. Hamilton, S. Vardoulakis, C. Heaviside, and H. Macintyre (2016). Development of an England-wide indoor overheating and air pollution model using artificial neural networks. *Journal of Building Performance Simulation*, 1–14.
11. Sokolov V.I. Opredelenie peredatocnyh funkciy elektrogidravlichesкого sledyashchego privoda oborudovaniya dlya obrabotki davleniem / V.I. Sokolov, T. YA. Tavanyuk // *Visnik Skhidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu im. Volodimira Dalja*. – 2011. – № 1 (155). – CH.1. pp. 130-135.
12. Sokolova YA.V. Nelinejnaya matematicheskaya model' elektrogidravlichesкого sledyashchego privoda s drossel'nym regulirovaniem/ Sokolova YA.V., Tvanyuk T.YA., Sokolov V.I. // *Visnik Skhidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu im. Volodimira Dalja*. – 2010. – № 10(152). – pp. 168–175.
13. Kovalevskij S. V. Razvitie metodov akusticheskoy diagnostiki v mashinostroenii: monografiya / S. V. Kovalevska, V. I. Tulupov. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – 91 p.
14. Kovalevskii S. V. Diagnostics of Technological Systems and Engineering Products (using neural network approach) : scientific monography / S. V. Kovalevska, P.V. Dašić. – Vrnjačka Banja : SaTCIP, 2016. – 169 p.
15. Diagnostika tekhnologichnih sistem i virobiv mashinobuduvannya (z vikoristannjam nejromerezhevego pidhodu) : monografiya / S.V. Kovalevs'kij, O.S. Kovalevs'ka, E.O. Korzhov, A.O. Koshevoj ; za zag. red. d.t.n., prof. S.V. Kovalevs'kogo. – Kramators'k : DDMA, 2016. – 186 p.
16. Kovalevska O. S. Application of acoustic analysis in control systems of robotic machine tools / O. S. Kovalevska, S. V. Kovalevskyy // *Naukovij zhurnal «Radioelektronika, informatika, upravlinnya», «Radio Electronics, Computer Science, Control»*. – 2018. – № 2 (45). – pp. 51–59.
17. Stroitel'naya mekhanika : ucheb.-metod. kompleks dlya studentov special'nosti 1-70 02 01 i slushatelej IPK UO «PGU» special'nostej 1-70 02 71, 1-70 04 71. V 3 ch. CH. 3. Osnovy dinamiki i ustojchivosti sooruzhenij / sost. i obshch. red. L. S. Turishcheva. – Novopolock : PGU, 2010. – 136 p.

References (transliterated)

1. Kuznecov Yu.M. Svitovi tendencii i perspektivi rozvitku verstatobuduvannya v Ukraїni // "Problemi fiziko-matematichnoi i technichnoi osviti i nauki Ukraїni v konteksti evrointegracii". - K.: NPU im. M.P. Dragomanova, 2007. – pp.45...55.
2. Tomashevskij V.M. Modelyuvannya sistem / Tomashevskij V.M. – K.: Vidavnicna grupa VNV, 2007. – 352 s. 3.ZHilenkov A. A. Modelirovanie adaptivnogo upravleniya v slozhnyh raspredelennyh sistemah s identifikaciej parametrov / A. A. ZHilenkov, S. G. CHyornyj // *Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu*. – 2013. – №6. – pp. 253–260.
4. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. Grey Wolf Optimizer / In *Advances in Engineering Software*. 2014. Vol. 69. P. 46-61. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
5. Kulikov S.I., Rizvanov F.F., Romanchuk V.A., Kovalevskij S.V.. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 135 p.
6. Duvenaud, D., J. R. Lloyd, R. Grosse, J. B. Tenenbaum, and Z. Ghahramani (2013, June). Structure Discovery in Nonparametric Regression through Compositional Kernel Search. In *Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning*, pp. 1166–1174.
7. Giannakis, G., M. Pichler, G. Kontes, H. Schranzhofer, and D. Rovas (2013). Simulation speedup techniques for computationally demanding tasks. In *Proceedings of the Building Simulation 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, pp. 3761–3768.
8. Maimon, O. and L. Rokach (2005). *Data mining and knowledge discovery handbook*, Volume 2. Springer. ISBN: 9780387098227.
- Mezi'c, I. (2005). Spectral properties of dynamical systems, model reduction and decompositions. *Nonlinear Dynamics* 41 (1-3), 309–325.
9. Safarzadegan Gilan, S., N. Goyal, and B. Dilkina (2016). Active Learning in Multi-objective Evolutionary Algorithms for Sustainable Building Design. In *Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 589–596. ACM.
10. Symonds, P., J. Taylor, Z. Chalabi, A. Mavrogianni, M. Davies, I. Hamilton, S. Vardoulakis, C. Heaviside, and H. Macintyre (2016). Development of an England-wide indoor overheating and air pollution model using artificial neural networks. *Journal of Building Performance Simulation*, 1–14.
11. Sokolov V.I. Opredelenie peredatocnyh funkciy elektrogidravlichesкого sledyashchego privoda oborudovaniya dlya obrabotki davleniem / V.I. Sokolov, T. YA. Tavanyuk // *Visnik Skhidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu im. Volodimira Dalja*. – 2011. – № 1 (155). – CH.1. pp. 130-135.
12. Sokolova YA.V. Nelinejnaya matematicheskaya model' elektrogidravlichesкого sledyashchego privoda s drossel'nym regulirovaniem/ Sokolova YA.V., Tvanyuk T.YA., Sokolov V.I. // *Visnik Skhidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu im. Volodimira Dalja*. – 2010. – № 10(152). – pp. 168–175.
13. Kovalevskij S. V. Razvitie metodov akusticheskoy diagnostiki v mashinostroenii: monografiya / S. V. Kovalevska, V. I. Tulupov. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – 91 p.
14. Kovalevskii S. V. Diagnostics of Technological Systems and Engineering Products (using neural network approach) : scientific monography / S. V. Kovalevska, P.V. Dašić. – Vrnjačka Banja : SaTCIP, 2016. – 169 p.
15. Diagnostika tekhnologichnih sistem i virobiv mashinobuduvannya (z vikoristannjam nejromerezhevego pidhodu) : monografiya / S.V. Kovalevs'kij, O.S. Kovalevs'ka, E.O. Korzhov, A.O. Koshevoj ; za zag. red. d.t.n., prof. S.V. Kovalevs'kogo. – Kramators'k : DDMA, 2016. – 186 p.
16. Kovalevska O. S. Application of acoustic analysis in control systems of robotic machine tools / O. S. Kovalevska, S. V. Kovalevskyy // *Naukovij zhurnal «Radioelektronika, informatika, upravlinnya», «Radio Electronics, Computer Science, Control»*. – 2018. – № 2 (45). – pp. 51–59.
17. Stroitel'naya mekhanika : ucheb.-metod. kompleks dlya studentov special'nosti 1-70 02 01 i slushatelej IPK UO «PGU» special'nostej 1-70 02 71, 1-70 04 71. V 3 ch. CH. 3. Osnovy dinamiki i ustojchivosti sooruzhenij / sost. i obshch. red. L. S. Turishcheva. – Novopolock : PGU, 2010. – 136 p.

Поступила (received) 17.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковалевська Олена Сергіївна (Ковалевская Елена Сергеевна, Olena Kovalevska) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5884-0430>; e-mail: olenakovalevska@gmail.com

Ковалевський Сергій Вадимович (Ковалевский Сергей Вадимович, Serhiy Kovalevskyy) – доктор технічних наук, професор, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4708-4091>; e-mail: kovalevskii@dgma.donetsk.ua

Г.И. КОСТЮК, В. В. ПОПОВ

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА И НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ ЗА СЧЁТ НАНЕСЕНИЯ НАНОПОКРЫТИЙ И ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР

В статье рассмотрена возможность повышения работоспособности и надёжности конструкции деталей из циркониевых сплавов за счёт нанесения нанопокрывтий и образования наноструктур при бомбардировке ионами B^+ , C^+ , N^+ , Si^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Fe^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , W^+ , Pt^+ (с зарядовыми числами 1, 2, 3) энергиями 200, 2000, 20000 эВ. Определены объёмы зёрен, минимальная и максимальная глубины их залегания. Это позволяет проектировать сложную структуру по глубине в зависимости от требований к упрочнённому слою. Получено, что практически для всех сортов ионов, кроме бора и углерода, в рассмотренном диапазоне энергий зарядовых чисел образуются наноструктуры.

Ключевые слова: циркониевый сплав, надёжность, ресурс, наноструктуры, нанопокрывтия, ионы.

Г. І. КОСТЮК, В. В. ПОПОВ

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ І НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ З ЦИРКОНІЄВОГО СПЛАВУ ЗА РАХУНОК НАНЕСЕННЯ НАНОПОКРИТТІВ І СТВОРЕННЯ НАНОСТРУКТУР

У статті розглянуто можливість підвищення працездатності і надійності конструкції деталей з цирконієвих сплавів за рахунок нанесення нанопокриттів і створення наноструктур при бомбардуванні іонами B^+ , C^+ , N^+ , Si^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Fe^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , W^+ , Pt^+ (з зарядовими числами 1, 2, 3) енергіями 200, 2000., 20000 еВ. Визначено об'єми зерен, мінімальна і максимальна глибини їх залягання. Це дозволяє проектувати складну структуру по глибині залежно від вимог до зміцненого шару. Отримано, що практично для всіх сортів іонів, крім бору і вуглецю, в розглянутому діапазоні енергій зарядових чисел утворюються наноструктури.

Ключові слова: цирконієвий сплав, надійність, ресурс, наноструктури, нанопокриття, іони.

G. KOSTYUK, V. POPOV

IMPROVING THE RESOURCE AND RELIABILITY OF DETAILS FROM ZIRCONIUM ALLOYS DURING THE APPLICATION OF NANOCOATING AND FORMATION OF NANOSTRUCTURES

The article considers the possibility of improving the performance and reliability of the design of parts made of zirconium alloys due to the application of nano-coatings and the formation of nanostructures during ion bombardment B^+ , C^+ , N^+ , Si^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Fe^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , W^+ , Pt^+ (with charge numbers 1, 2, 3) with energies of 200, 2000, 20,000 eV. The volume of grains and the minimum and a maximum depth of their occurrence are determined. This allows you to design a complex structure in-depth, depending on the requirements for the reinforced layer. It is found that nanostructures are formed practically for all types of ions, except for boron and carbon, in the considered range of charge-number energies.

Keywords: zirconium alloy, reliability, resource, nanostructures, nanocoatings, ions.

Введение. В настоящее время основными материалами для тепловыделяющего элемента используют циркониевые сплавы. В случае аварии и включения пассивного охлаждения активная зона реактора выделяет тепло, в результате чего вода будет преобразована в пар, окисление циркониевых сплавов ускоряется, а значит, будет образовываться взрывоопасный кислород, а также соединения Z_2O_2 , который также при разложении будет выделять тепло, что интенсифицирует процесс, а значит, повышается вероятность взрыва.

Можно предложить новые материалы для их создание, но и опробование займет не менее 10 лет.

В настоящее время создание наноструктур и нанопокрывтий на циркониевом сплаве могут решить эти вопросы достаточно быстро, что говорит о реальности применения наноструктур и нанопокровтий.

Состояние вопроса. В настоящее время есть значительное число работ по исследованию наноструктур и их получению, обзоры которых даны в монографиях [1–10]. Но работ, посвящённых исследованию получения наноструктур на циркониевых сплавах, практически нет, так как попытки получить на них ряд покровтий уже проводились [11–12]. Всё это говорит об актуальности и своевременности рассмотрения вопроса о нанесении нанопокровтий и создания наноструктур на элементах конструкций атомных реакторов.

Модель взаимодействия ионов с конструкционными материалами. Решалась совместная задача теплопроводности и термоупругости [3], что позволяет получить поле температур и температурных напряжений, по которым находились зоны материала, где реализуются критерии образования наноструктур: требуемый диапазон температур (500–1500К), достижение скорости роста температуры, большей 10^7 К/с, и наличие температурных напряжений в диапазоне $10^7 – 10^9$ Н/м², ускоряющих их образование, или 10^{10} Н/м², позволяющих образовывать непосредственно наноструктуры.

Результаты и их обсуждения. Рассматривалось действие ионов B^+ , C^+ , N^+ , Si^+ , Al^+ , V^+ , Cr^+ , O^+ , Fe^+ , Ni^+ , Co^+ , Y^+ , Zr^+ , Mo^+ , Hf^+ , Ta^+ , Pt^+ с зарядовыми числами 1, 2, 3 и энергиями 200, 2000, 20000 эВ, рассчитывались поля температур, скоростей их нарастания и температурные напряжений, по которым выбирались зоны материала, где реализовывались критерии образования наноструктур: температуры лежат в диапазоне 500 – 1500К, скорости их роста превышают 10^7 К/с или температурные напряжения превышают 10^{10} Н/м² и вычислялись объёмы зерна V_i , минимальная h_{min} и максимальная h_{max} глубины его залегания. Результаты представлены на рис. 1–18 для циркониевого сплава Zr1Nb.

© Г.И. Костюк, В.В. Попов, 2019

Так, для случая действия ионов бора имеем диапазон объемов зерна $1,57 \cdot 10^{-27}$ до $10,8 \cdot 10^{-22}$ м³ с минимальной глубиной залегания от $1,35 \cdot 10^{-9}$ до $6,39 \cdot 10^{-8}$ и максимальной от $1,9 \cdot 10^{-9}$ до $8,47 \cdot 10^{-8}$ м, а температурные напряжения от $8,1 \cdot 10^6$ до $1,3 \cdot 10^6$ м (рис.1).

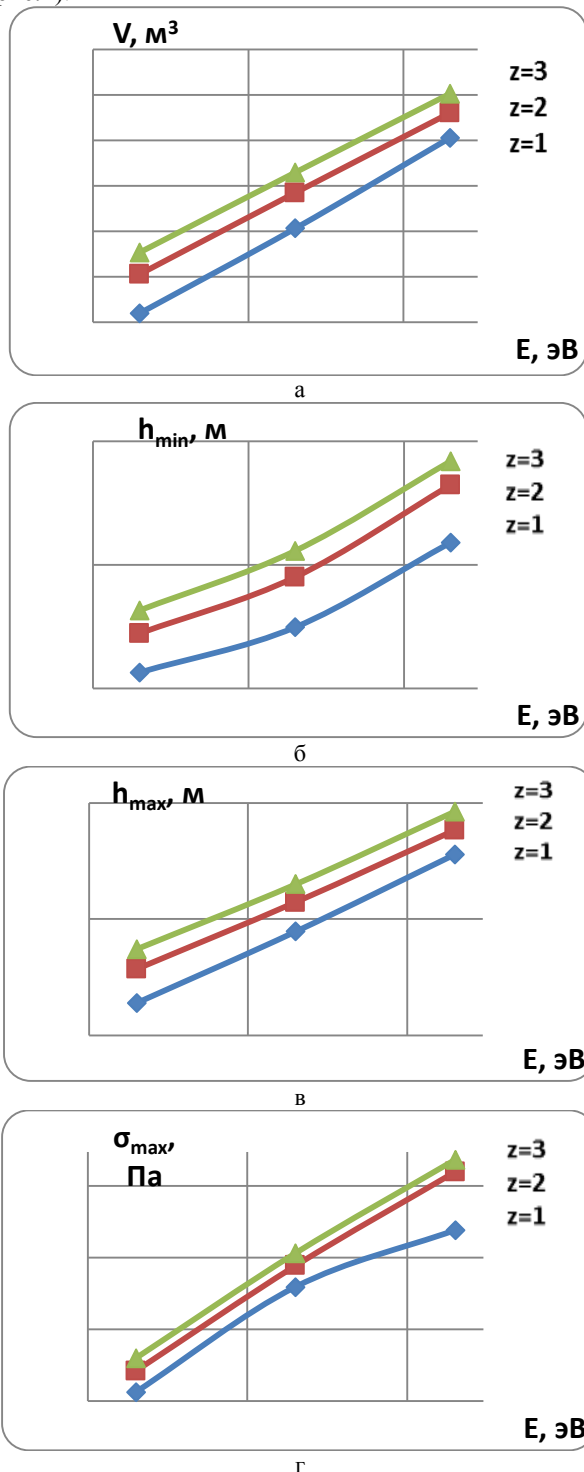


Рисунок 1 - Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов бора (В⁺) с различным зарядом (z = 1, z = 2, z = 3) на циркониевый сплав Zr1Nb

Для ионов углерода (С⁺) на рис. 2 имеем изменение объема НК от $1,58 \cdot 10^{-27}$ до $7,9 \cdot 10^{-23}$ м³, а глубины залегания: минимальная от $1,16 \cdot 10^{-9}$ до $5,94 \cdot 10^{-8}$ и максимальная от $1,81 \cdot 10^{-9}$ до $7,47 \cdot 10^{-8}$ м, и σ от $1,6 \cdot 10^7$ до $1,2 \cdot 10^9$ Па (рис. 2)

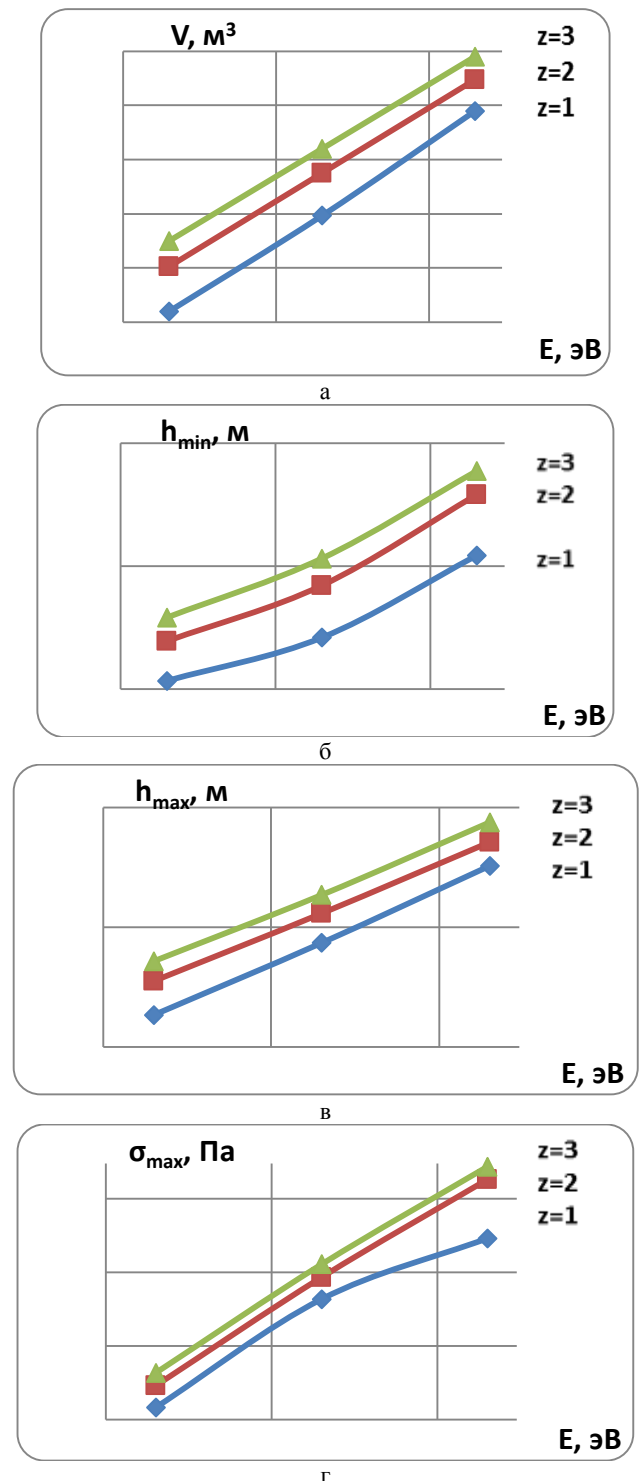


Рисунок 2 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов углерода (С⁺) с различным зарядом (z = 1, z = 2, z = 3) для циркониевого сплава Zr1Nb

Для ионов N^+ имеем диапазон объемов зерна от $1,51 \cdot 10^{-27}$ до $6,24 \cdot 10^{-23}$ м³, а напряжение от $\sigma_T = 7,14 \cdot 10^7$ до $4,8 \cdot 10^8$. Так же, как и для ионов бора и углерода, с ростом энергии или увеличением зарядового числа объем НС увеличивается температурные напряжения (рис. 3).

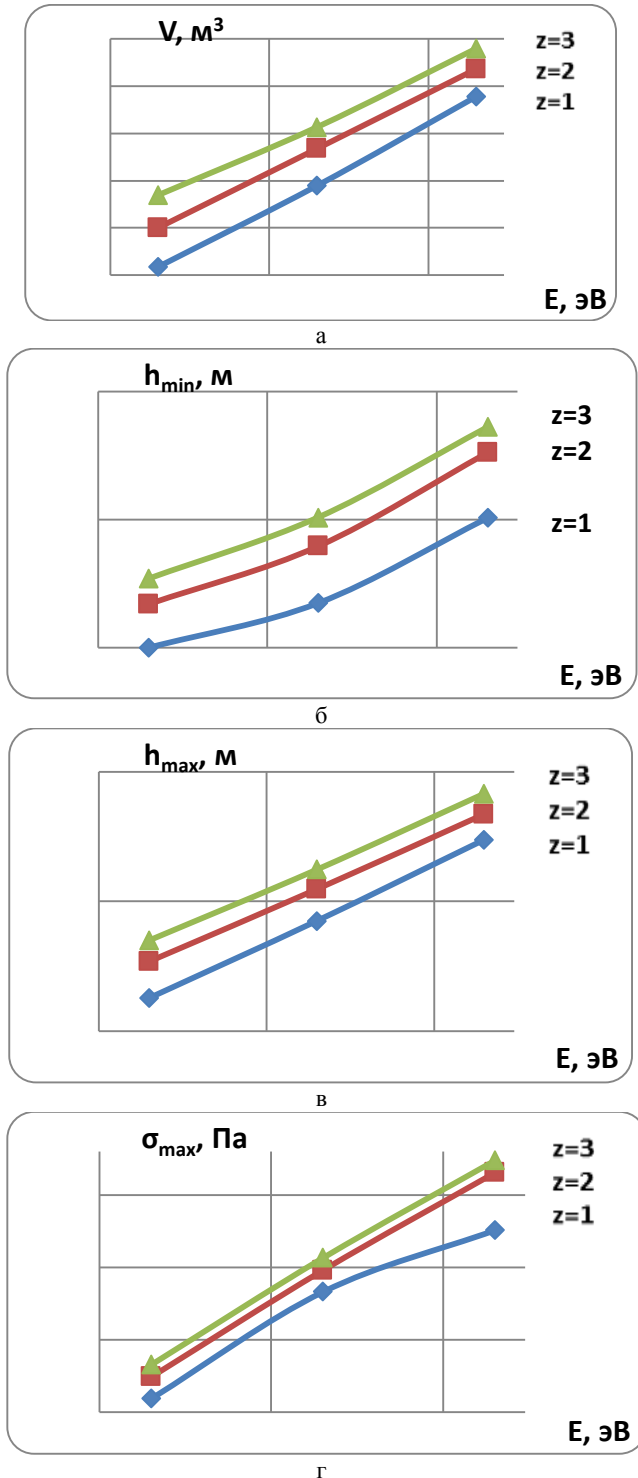


Рисунок 3 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов азота (N^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Видно, что с ростом энергии, заряда и величины температурных напряжений объем существенно растет.

Переход к ионам алюминия (Al^+ , рис. 4) величины объемов НС лежат в пределах $1,4 \cdot 10^{-27}$ до $5,8 \cdot 10^{-2}$ до $4 \cdot 10^{-23}$ м³, а глубины залегания от $7,5 \cdot 10^{-10}$ до $4 \cdot 10^{-9}$ м минимальные и от $1,7 \cdot 10^{-10}$ до $5,2 \cdot 10^{-8}$ м (рис. 4)

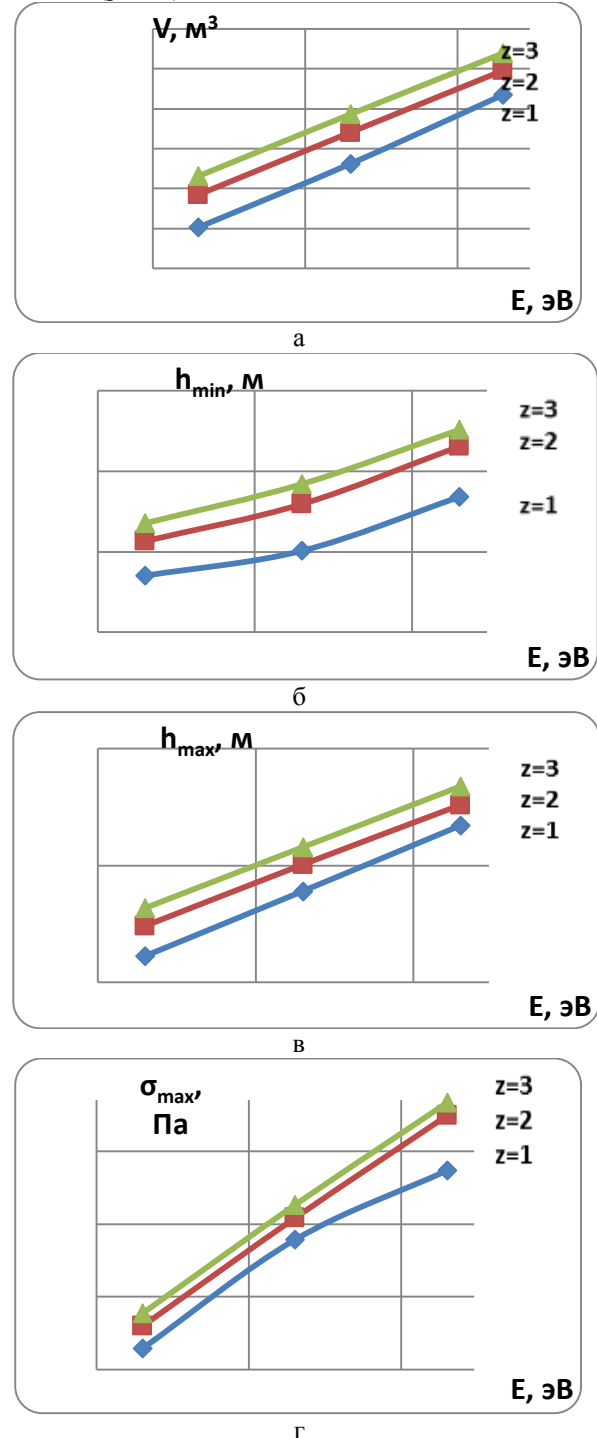


Рисунок 4 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов алюминия (Al^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Рост объема НС, температурных напряжений и глубин залегания от энергии иона и его заряда сохраняется (рис. 4).

Для иона алюминия (рис. 5, Al^+) значения объемов лежат в пределах $1,06 \cdot 10^{-27}$ до $2,45 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а глубины залегания его: минимальная $5,02 \cdot 10^{-10}$ – $3,29 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, максимальная $1,69 \cdot 10^{-9}$ – $4,72 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, а $\sigma_T = 6,77 \cdot 10^6$ – $7 \cdot 10^7 \text{ Па}$. Сохраняется рост этих величин с увеличением энергии и заряда иона. Рост V от массы иона значительно снижается.

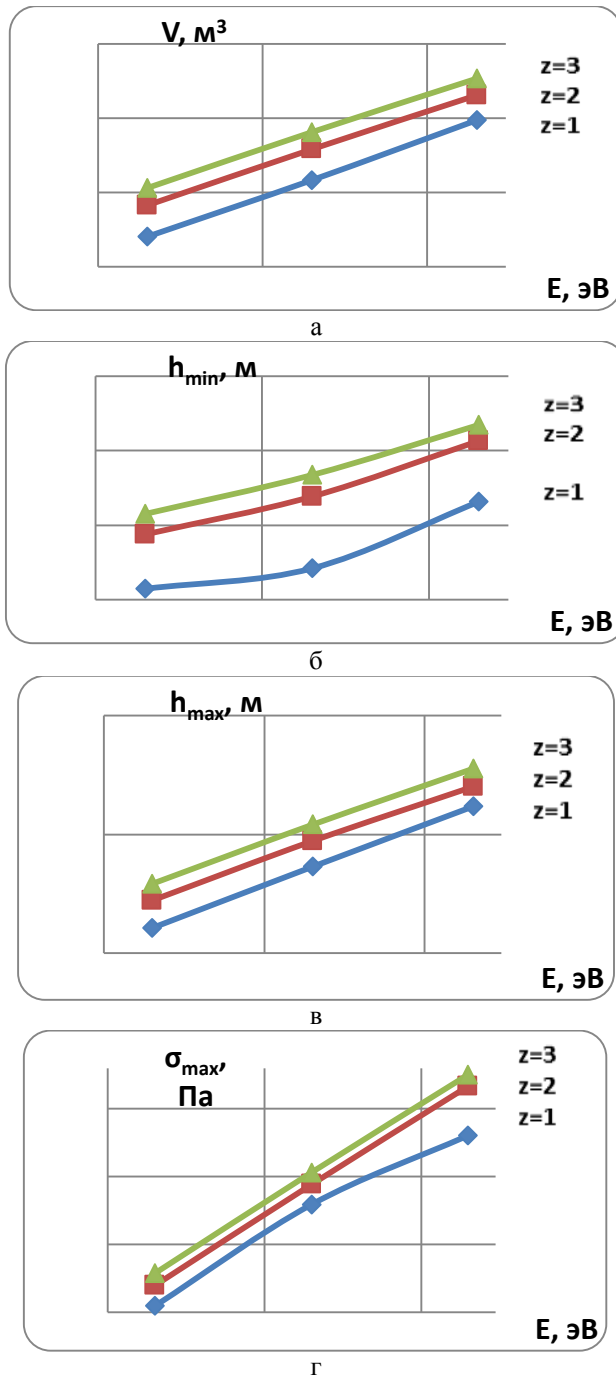


Рисунок 5 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов ванадия (V^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Аналогичные особенности для иона хрома (Cr^+ , рис. 6) показывают, что объем НС лежит в пределах $6,25 \cdot 10^{-28}$ до $1,14 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а глубины залегания $1,41 \cdot 10^{-10}$ – $2,23 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $1,6 \cdot 10^{-9}$ – $3,58 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, соответственно минимальная и максимальная, а $\sigma_T = 1,48 \cdot 10^7$ – $7,69 \cdot 10^7 \text{ Па}$.

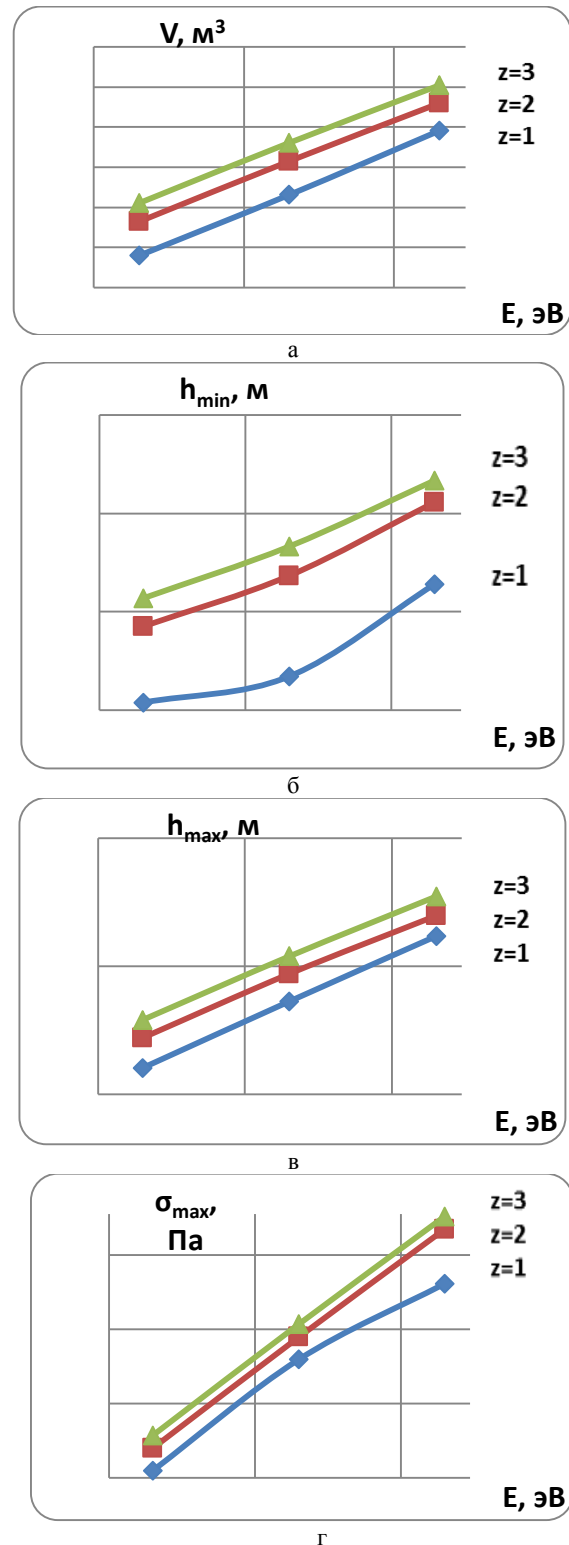


Рисунок 6 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов хрома (Cr^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Характер зависимости сохранился.

При переходе к ионам кислорода диапазон объемов НС лежит в пределах $6,25 \cdot 10^{-28}$ до $1,09 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а глубины залегания в пределах $1,3 \cdot 10^{-10}$ – $2,18 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $1,61 \cdot 10^{-9}$ – $3,52 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, а $\sigma_T = 4,7 \cdot 10^6$ – $7,5 \cdot 10^7 \text{ Па}$ соответственно (рис.7).

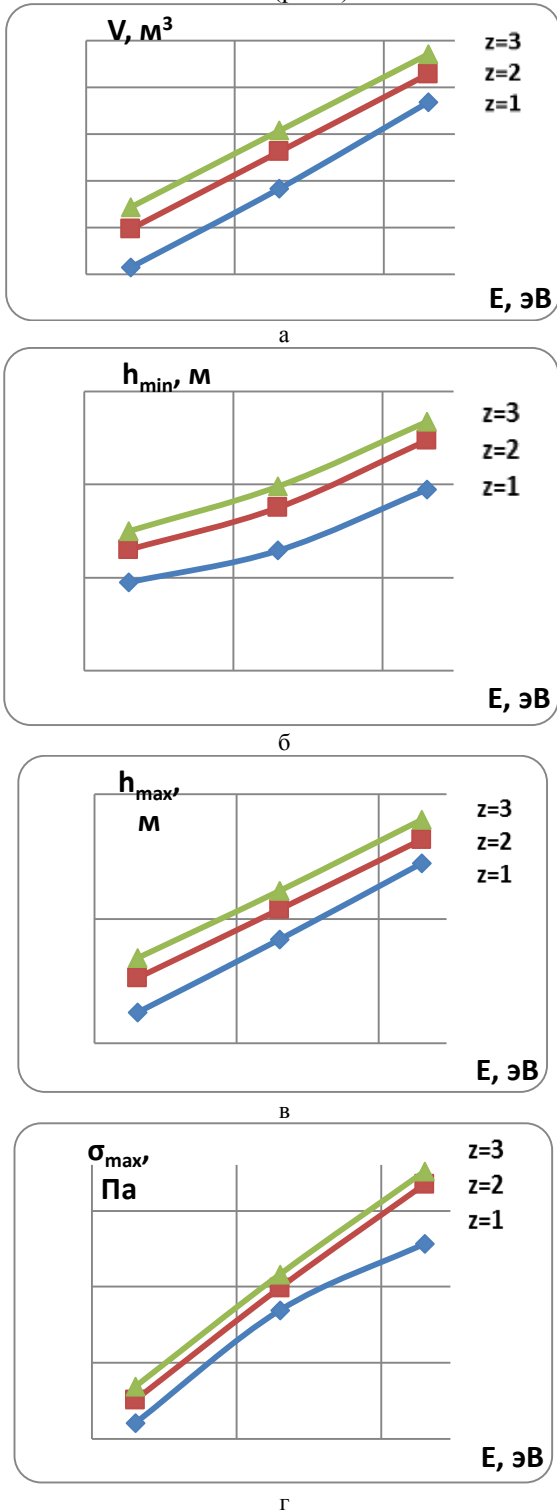


Рисунок 7 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов кислорода (O^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Для иона железа (Fe^+ , рис. 8) объёмы НС лежат в диапазоне $1,43 \cdot 10^{-27}$ до $5,13 \cdot 10^{-23} \text{ м}^3$, а глубины залегания $8,9 \cdot 10^{-10}$ – $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $1,78 \cdot 10^{-9}$ – $6,25 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, а $\sigma_T = 1,47 \cdot 10^7$ – $1,07 \cdot 10^8 \text{ Па}$ соответственно. Величины колерируют с массой иона: чем больше масса, тем меньше значение (рис. 8).

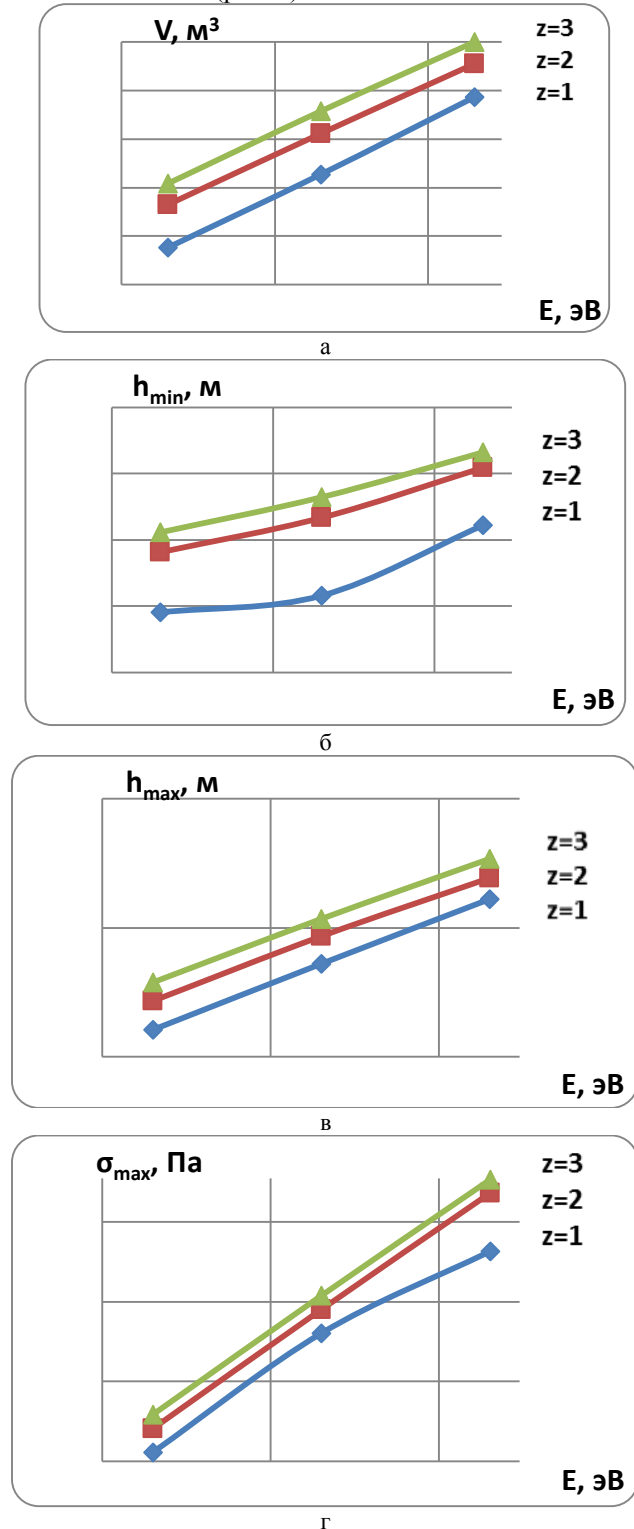


Рисунок 8 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов железа (Fe^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Объём НК для случая действия ионов железа (Fe^+ , рис. 9) составляет величины $5,8 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3$, а глубины залегания $8,09 \cdot 10^{-11}$ – $2,98 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$ и $1,61 \cdot 10^{-9}$ – $3,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, а $\sigma_T = 4,64 \cdot 10^6$ – $7,28 \cdot 10^7 \text{ Па}$ соответственно.

Для иона кобальта (Co^+ , рис. 10) объёмы лежат в пределах $5,42 \cdot 10^{-28}$ – $9,28 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, а глубины залегания $4,61 \cdot 10^{-10}$ – $1,99 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $5,45 \cdot 10^{-9}$ – $3,32 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $\sigma_T = 4,54 \cdot 10^6$ – $7,2 \cdot 10^7 \text{ Па}$ соответственно.

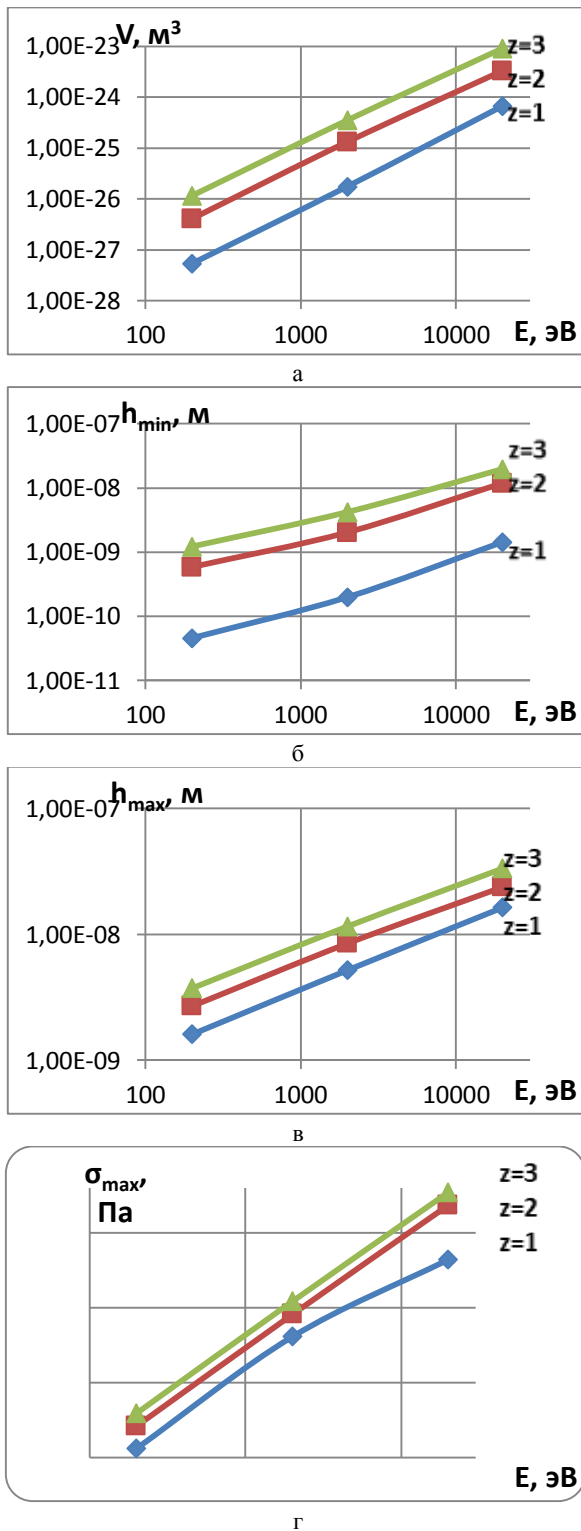


Рисунок 9 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов никеля (Ni^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

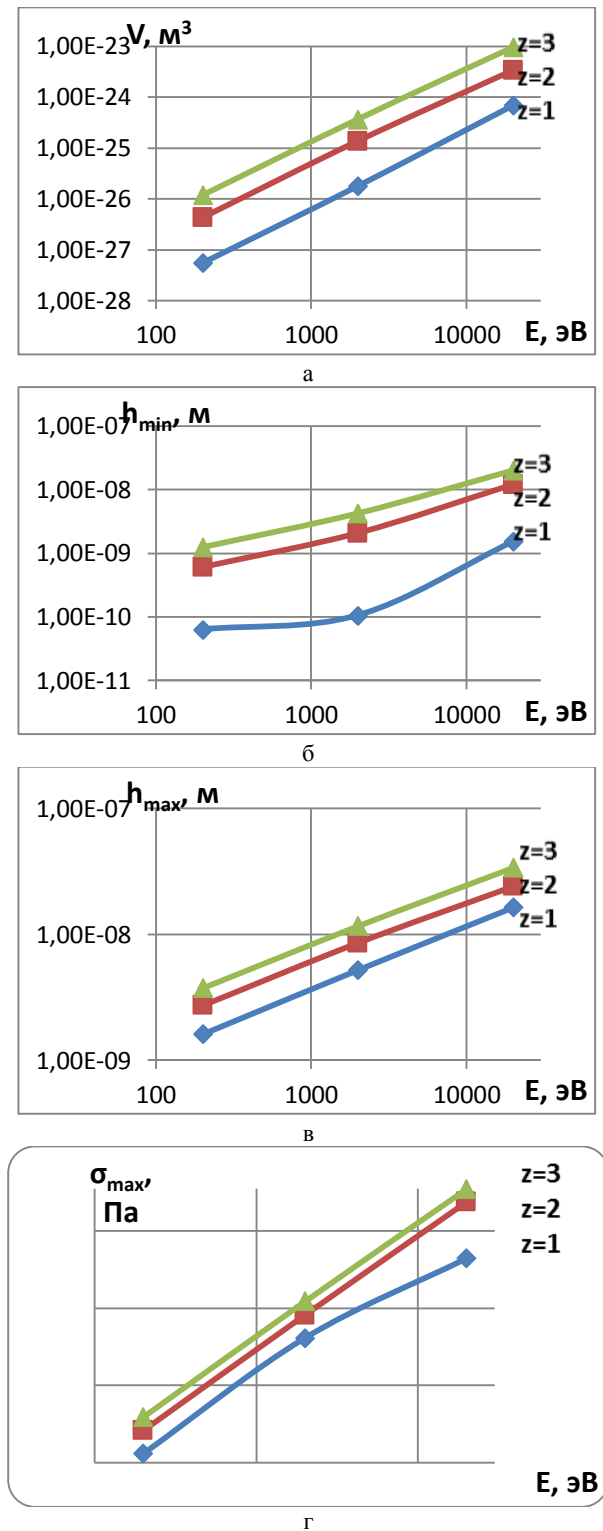


Рисунок 10 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов кобальта (Co^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Аналогичные зависимости для иона кобальта (Co^+ , рис. 11) дают значения объема НС $5,1 \cdot 10^{-28} - 9,59 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, а глубины залегания $6,33 \cdot 10^{-10} - 2,04 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $4,16 \cdot 10^{-9} - 3,36 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, $\sigma_T = 4,59 \cdot 10^6 - 7,41 \cdot 10^7 \text{ Па}$ соответственно.

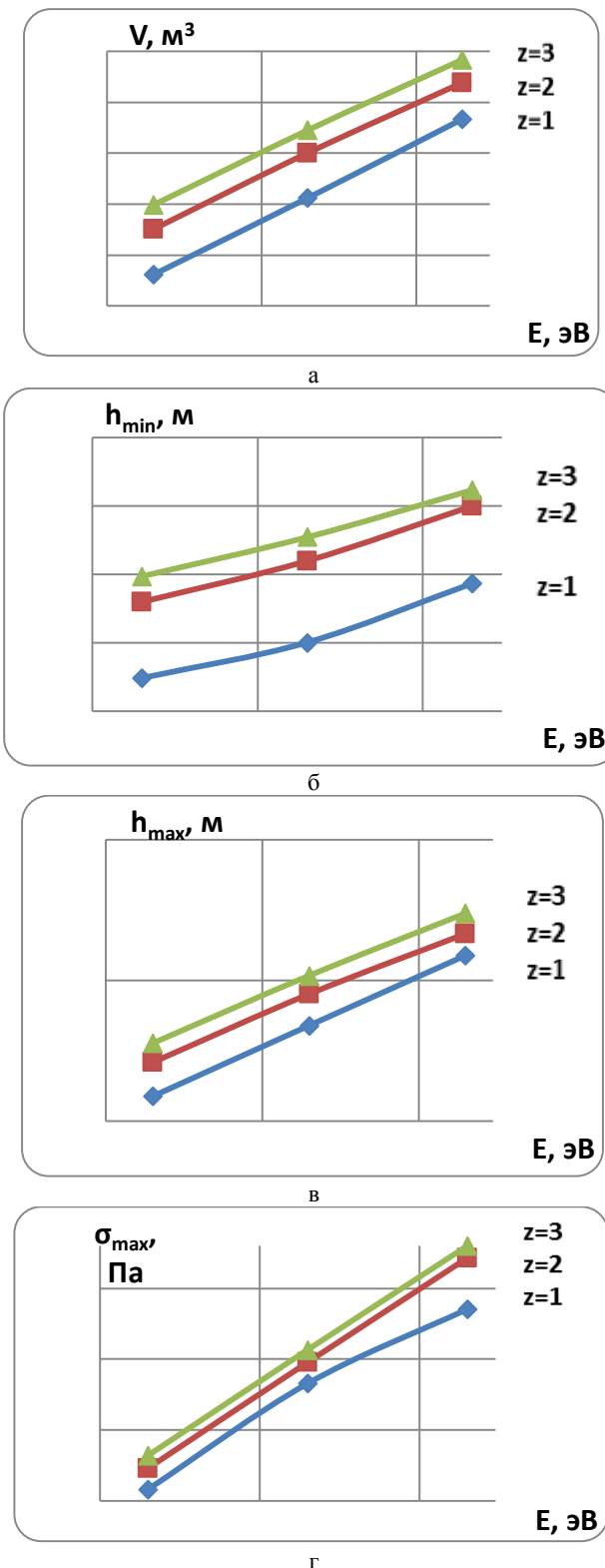


Рисунок 11 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Применение ионов циркония приводит к изменению объема зерна НС $V = 4,15 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3 - 6,9 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$, $\sigma_T = 4,8 \cdot 10^6 - 6,69 \cdot 10^6 \text{ Па}$, т. е. тенденция сохраняется (рис. 12).

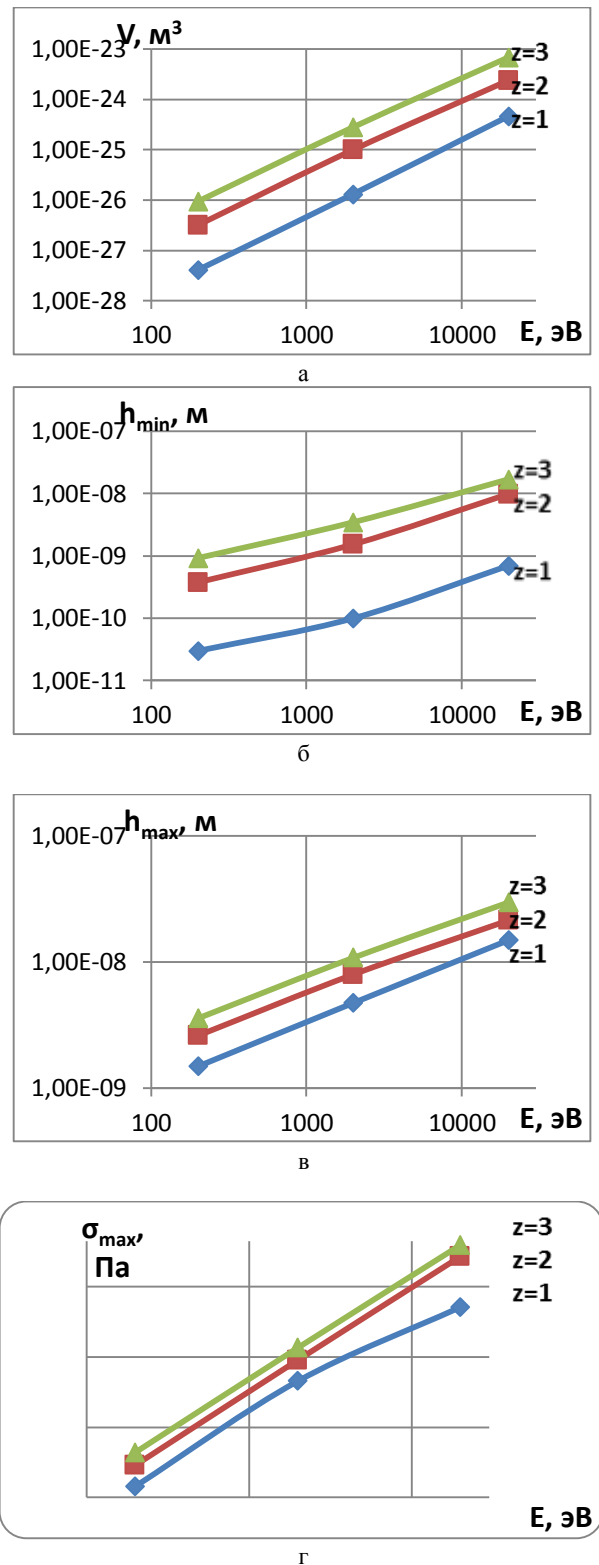
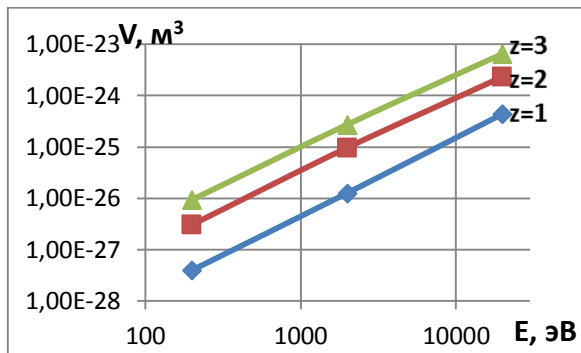


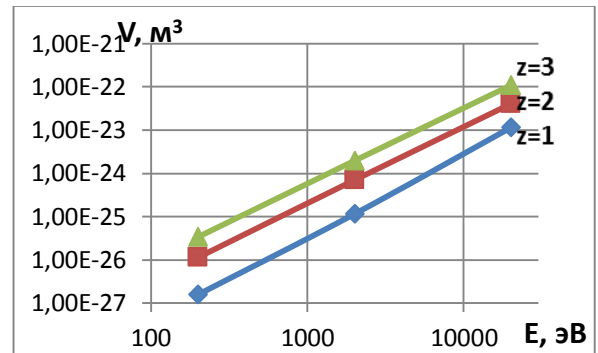
Рисунок 12 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов циркония (Y^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Для ионов молибдена имеем $V = 4,48 \cdot 10^{-28} - 6,7 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$. $\sigma_T = 4,4 \cdot 10^6 - 6,88 \cdot 10^7 \text{ Па}$ (рис. 13).

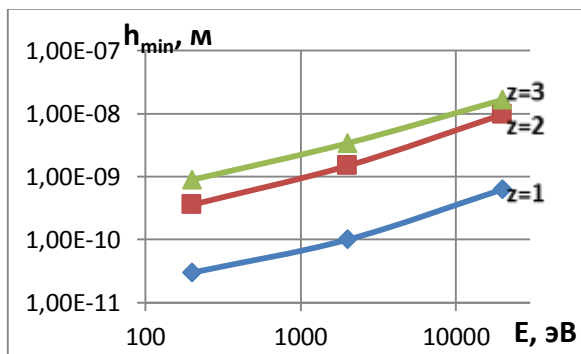
Переход к ионам гафния даёт объём НС $V = 3,24 \cdot 10^{-28} - 5,22 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ $\sigma_T = 3,15 \cdot 10^7 - 6,48 \cdot 10^7 \text{ Па}$.



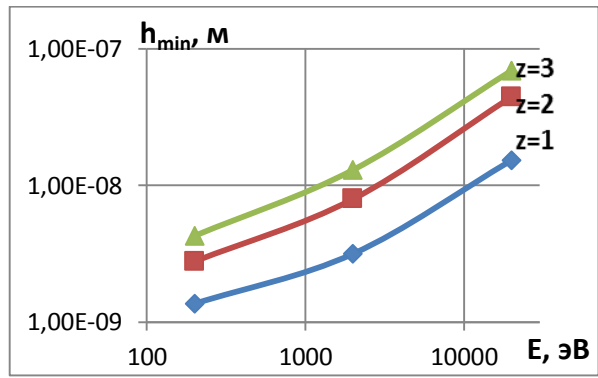
а



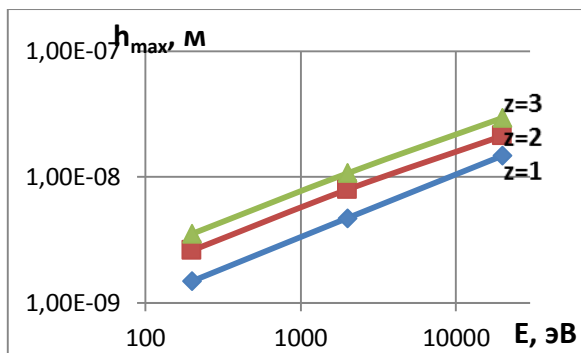
а



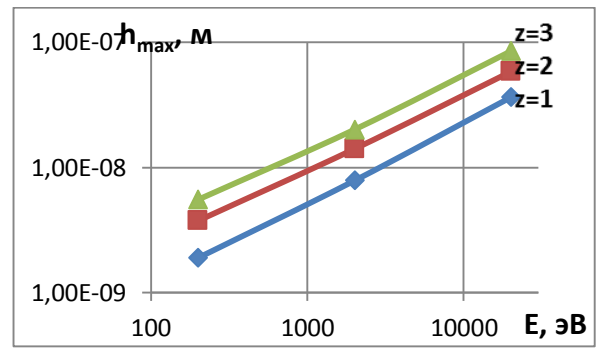
б



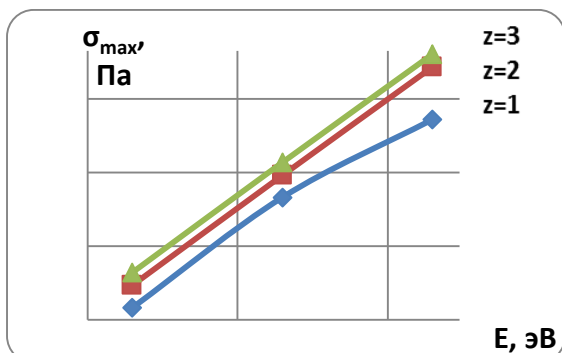
б



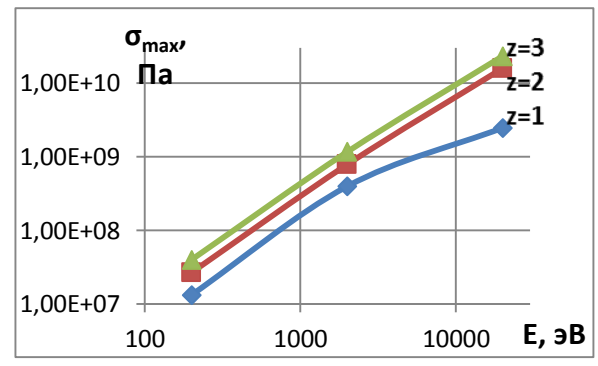
в



в



г

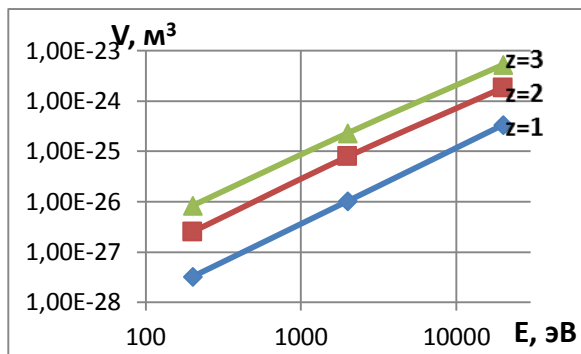


г

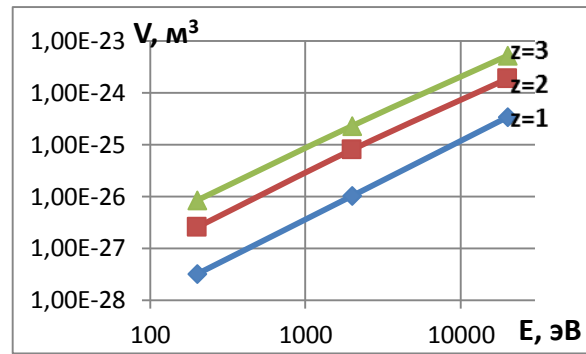
Рисунок 13 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов молибдена (Mo^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Рисунок 14 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) ионов бора (B^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркония и его сплава Zr1Nb

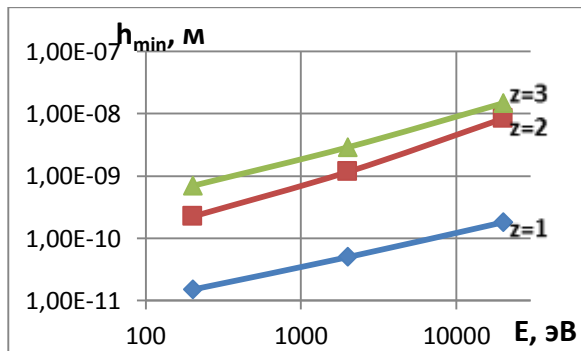
Для ионов тантала, вольфрама и платины имеем близкое значение (рис. 15, 16, 17).



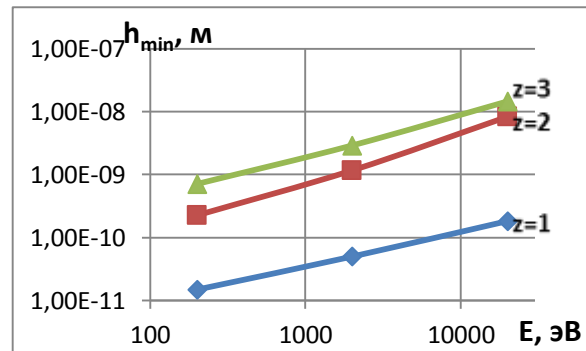
а



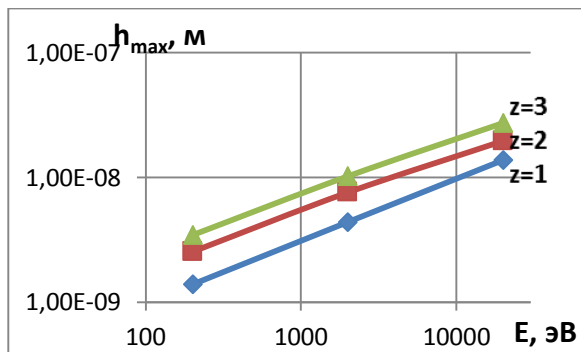
а



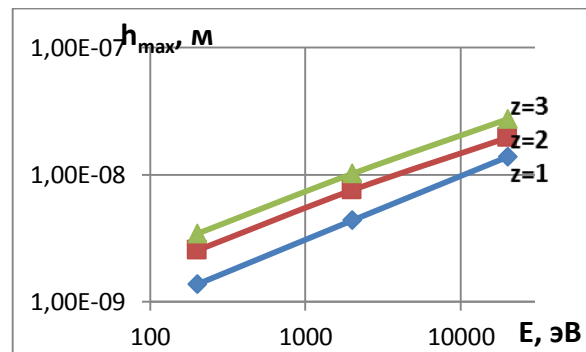
б



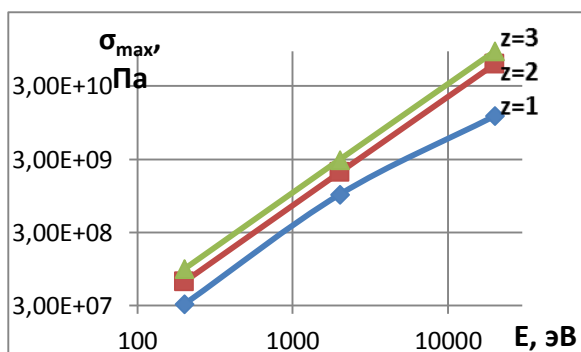
б



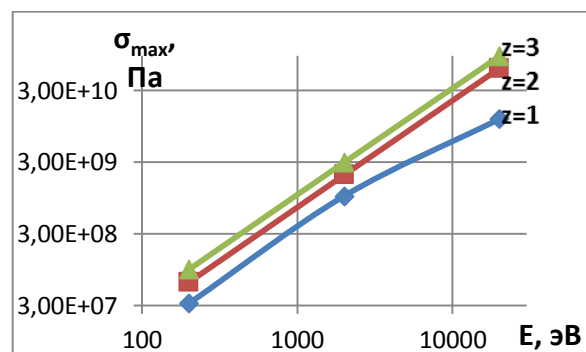
в



в



г



г

Рисунок 15 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов тантала (Ta^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

Рисунок 16 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов вольфрама (W^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава $Zr1Nb$

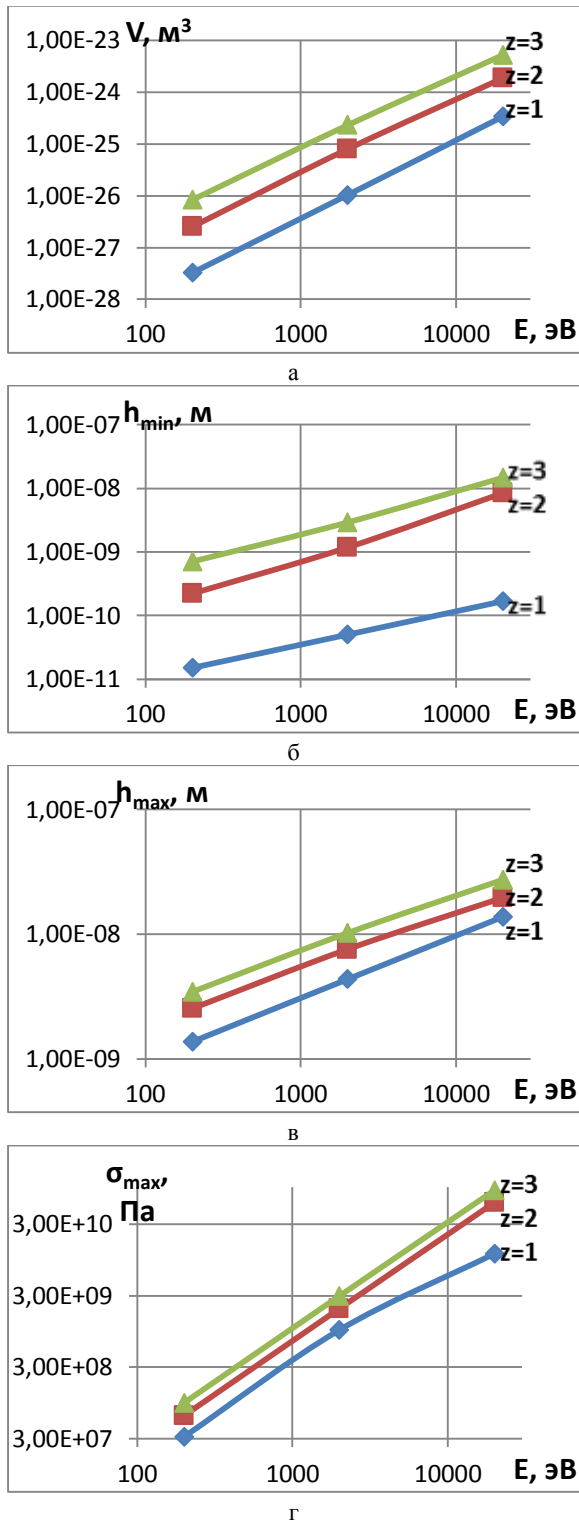


Рисунок 17 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК, максимальных температурных напряжений (г) при действии ионов платины (Pt^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для циркониевого сплава Zr1Nb

Выводы

Показана возможность получения слоёв наноструктур достаточной величины до 0,1 мм за счёт варьирования энергии ионов, их сортов и зарядов.

Для уменьшения вероятности прохождения ненужных реакций можно использовать ионы

циркония и ниобия, которые присутствуют в циркониевом сплаве Zr1Nb .

Учитывая нейтральность материалов к воде, кислороду и другим реагентам можно выбирать наиболее дешёвые ионы из тяжёлых металлов для обработки циркониевых сплавов.

Список литературы

1. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справ.* в 2 кн. Кн.1. *Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии.* Харьков: «Планета-Принт», 2016. 735 с.
2. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: монография.* Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. 472 с.
3. Костюк Г. И. *Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: монография.* Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. 648 с.
4. Костюк Г. И. *Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность: учеб. пособ.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. 406 с.
5. Костюк Г. И. *Научные основы создания современных технологий: учеб. пособ.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: монография-справочник.* Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. 633 с.
7. Костюк Г. И. *Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справочник.* Киев.: Вид-во АНУ, 2003. 412 с.
8. Гречихин Л. И. *Физика наночастиц и нанотехнологий* Москва: УП «Технопринт», 2004. 397 с.
9. Гусев А. И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии.* Москва: Физматлит, 2005. 416 с.
10. Андриевский Р. А., Рагуля А. В. *Наноструктурные материалы.* – Москва: Издательский центр «Академия», 2005. – 117 с.
11. Карасева Е. В., Соколенко В. И., Белоус В. А., Носов Г. И. Ползучесть сплава Zr1Nb , модифицированного облучением ионами молибдена IX Межд. Семинар «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий» (МНТ-ХІ), Тез. докл. (Обнинск, 12–16 июля, 2007 г.). Обнинск, 2007. С.120, 121.
12. Неклюдов И. М., Ажажа В. М., Белоус В. А. и др. Влияния деформации структур, сформированных в Zr и Zr1Nb при пластической деформации ковкой, на профиль залегания имплантированного Ag Тр. 18 Межд. конф. по физ. радиац. явлений и радиац. Материаловедению (Алушта, Украина. 8 – 13 сент., 2008). Алушта, 2008. С. 154, 155

References (transliterated)

1. Kostyuk G. I. *Effective cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers: monograph-reference.* in 2 books. Book 1. *Plasma-ion and ion-beam technologies.* Kharkov: "Planet-Print", 2016. 735 p.
2. Kostyuk G. I. *Nanotechnologies: selection of technological parameters and installations, processing capacity, physical and mechanical characteristics of nanostructures: monograph.* Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2014. 472 p.
3. Kostyuk G. I. *Nanotechnology: theory, experiment, technology, perspectives: monograph.* Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2012. 648 p.
4. Kostyuk G. I. *Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality: Proc. Help.* Kharkov: The national. aerospace. University of «Kharkov. aviats. in-t», 2009. 406 p.
5. Kostyuk G. I. *Scientific foundations of the creation of modern technologies: Textbook. Help.* Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2008. 552 p.

6. Kostyuk G. I. *Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer*: a monograph-reference book. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. Kostyuk G. I. *Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer*: a reference book. Kiev: View of AINU, 2003. 412 p.
8. Grechikhin L. I. *Physics of Nanoparticles and Nanotechnologies*. Moscow: UP "Technoprint", 2004. 397 p.
9. Gusev A. I. *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies*. Moscow: Fizmatlit, 2005. 416 p.
- Andriyevskiy R. A., Ragulya A. V. Nanostrukturnyye materialy [Nanostructured Materials]. Moskva: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2005. – 117 p.
- Karaseva Ye. V., Sokolenko V. I., Belous V. A., Nosov G. I. Polzuchest' osnashchena Zr1Nb, modifitsirovannym oblucheniyem ionami molibdena [Creep is equipped with Zr1Nb modified by irradiation with molybdenum ions] IKH Mezhd. Seminar «Strukturnyye osnovy modifikatsiy materialov metodov netraditsionnykh tekhnologiy» [IKH int. Seminar «Structural bases of materials modification methods of non-traditional technologies»] (MNT-KHÍ), Tez. dokl. (Obninsk, 12–16 iyulya, 2007 g.). – Obninsk, 2007. – p.p. 120, 121.
- Neklyudov I. M., Azhazha V. M., Belous V. A. i dr. Vliyaniya deformatsii strukturnykh, sformirovannykh v Zr i Zr1Nb pri plasticheskoy deformatsii kovkoy, na profil' zaleganiya implantirovannogo Ar [Effects of structural deformation, formed in Zr and Zr1Nb during plastic deformation by forging, on the profile of occurrence of implanted Ar] // Tr. 18 Mezhd. konf. po fiz. radiats. yavleniy i radiats. Materialovedeniyu (Alushta, Ukraina. 8–13 sentyabrya., 2008). Alushta, 2008. – p.p. 154, 155.

Поступила (received) 17.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Gennady Kostyuk) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

Попов Віктор Васильович (Попов Виктор Васильевич, Viktor V Popov) – кандидат технічних наук, ПАО «ФЭД»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9189-6882>; e-mail: vvpopov123@gmail.com

А.О. СКОРКІН, О.Л. КОНДРАТЮК, О.П. СТАРЧЕНКО, А.С. ПРОТОПОПОВА

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ЛІНІЇ РІЗУ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГУ, ВСТАНОВЛЕНОГО НА ГІДРОШПИНДЕЛІ

Рівняння гіроскопічного приладу або системи є наближеною математичною моделлю реального виробу, що дозволяє без використання натурального макетування досліджувати його основні властивості та отримати кількісні характеристики цікавлять нас параметрів. На практиці зазвичай не вдається скласти рівняння, які в повній мірі відповідають властивостям виробів, і тим більше провести їх аналіз в загальному вигляді. Тому спочатку складають рівняння з урахуванням тих чи інших спрощують припущень, а потім вже приводять їх до виду, доступному для аналізу будь-яким обраним способом. У статті розглянута робота пристрою для шліфування криволінійних поверхонь безкопирним способом, який базується на гіроскопічних властивості швидко обертаючих тіл.

Ключевые слова: гіроскоп, гірошпиндель, шліфування, математична модель.

А.О. СКОРКИН, О.Л. КОНДРАТЮК, Е.П. СТАРЧЕНКО, А.С. ПРОТОПОПОВА

ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ ЛИНИИ РЕЗА ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА, УСТАНОВЛЕННОГО НА ГИДРОШПИНДЕЛИ

Уравнения гироскопического прибора или системы являются приближенной математической моделью реального изделия, позволяющей без использования натурального макетирования исследовать его основные свойства и получить количественные характеристики интересующих нас параметров. На практике обычно не удается составить уравнения, в полной мере соответствующие свойствам изделия, и тем более провести их анализ в общем виде. Поэтому изначально составляют уравнения с учетом тех или иных упрощающих допущений, а затем уже приводят их к виду, доступному для анализа каким-либо выбранным способом. В статье рассмотрена работа устройства для шлифования криволинейных поверхностей безкопирным способом, который базируется на гироскопических свойствах быстро вращающихся тел.

Ключові слова: гіроскоп, гірошпиндель, шліфування, математична модель.

A. SKORKIN, O. KONDRATIUK, O. STARCHENKO, A. PROTOPOPOVA

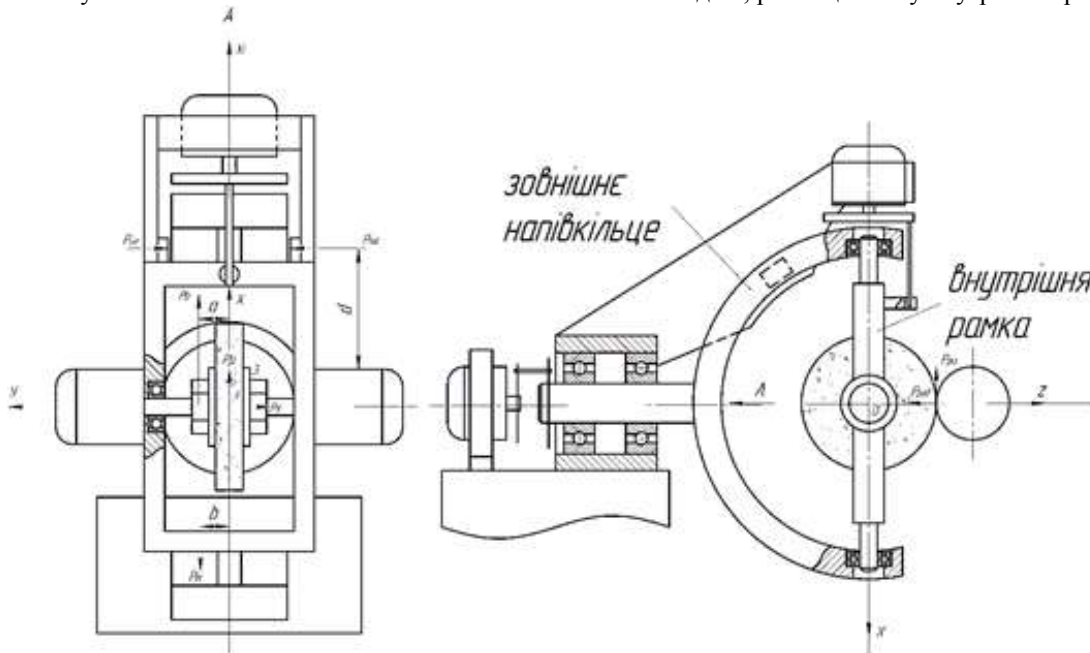
STUDIES OF THE KINEMATICS OF THE GRINDING WHEEL CUTTING LINE MOUNTED ON ELECTRICAL SPINDLES

The equations of a gyroscopic device or system are an approximate mathematical model of a real product, which allows one to investigate its basic properties without using natural prototyping and obtain quantitative characteristics of the parameters of interest to us. In practice, it is usually not possible to formulate equations that fully correspond to the properties of the product, and even more so to analyze them in general form. Therefore, they initially make up the equations taking into account certain simplifying assumptions and then bring them into a form that is available for analysis in some chosen way. The article describes the operation of the device for grinding curvilinear surfaces in a non-copier manner, which is based on the gyroscopic properties of rapidly rotating bodies.

Keywords: gyroscope, gyro spindle, grinding, mathematical model.

Вступ. Конструкція гірошпинделя описана в [1]. Її аналіз показує, що гірошпиндель можна розглядувати як систему взаємопов'язаних елементів – зовнішнього

напівкільця на нерухомій основі, внутрішньої рамки і шліфувального круга (ротора), розміщеного на шпинделі, розміщеного у внутрішній рамці (рис. 1).



Конструкція гірошпинделя

Рисунок 1 -

© А.О. Скоркін, О.Л. Кондратюк, О.П. Старченко, А.С. Протопопова, 2019

Методика експериментальних досліджень.

Для опису руху елементів системи - гірошпинделя – використаємо в якості вихідного рівняння Лагранжа другого роду для механічної неконсервативної системи.

Процедура одержання математичної моделі включає в себе:

- ідеалізація конструктивної схеми і вибір розрахункової схеми з необхідними системами координат

- складання рівнянь Лагранжа

Розрахункова схема має такі системи координат:

- $OXYZ$ – система, що зв'язана з внутрішньою рамкою; в ній вісь OY направлена поздовж осі обертання шліфувального круга;

- $OX_1Y_1Z_1$ – система, що зв'язана з зовнішнім напівкільцем; в ній вісь OZ_1 направлена уздовж осі обертання напівкільця, а OX_1 – поздовж осі обертання внутрішньої рамки;

- $OX'_1Y'_1Z'_1$ – система, що зв'язана з зовнішнім напівкільцем. В ній $O_1X'_1$, $O_1Y'_1$ є проєкціями осей OX_1 і OY_1 на вертикальну площину; вони проєктуються в натуральну величину;

- $OX_2Y_2Z_2$ – система нерухома, що являється базою відліку.

За узагальнені координати, що характеризують положення елементів гірошпинделя в будь-який час, приймаємо кут прецесії в вертикальній площині – α , кут прецесії в горизонтальній площині – β , кут повороту шліфувального круга – γ .

Відповідно кутова швидкість обертання гірошпинделя навколо осі Z_1 – α' , обертання внутрішньої рамки навколо осі X_1 – β' , шліфувального круга (ротора) – навколо осі Y – γ' .

В загальному вигляді для гірошпинделя рівняння Лагранжа мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\alpha'} \right) - \frac{dT}{d\alpha} &= Q_\alpha \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\beta'} \right) - \frac{dT}{d\beta} &= Q_\beta \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{dT}{d\gamma'} \right) - \frac{dT}{d\gamma} &= Q_\gamma \end{aligned} \right\}$$

тут T – кінетична енергія гірошпинделя в цілому, як системи, при вираженні через узагальнені швидкості;

Q_α , Q_β , Q_γ – узагальнені сили.

Оскільки кінетична енергія визначається по

рівнянню $T = \frac{I \times \omega^2}{2}$, то необхідно визначити абсолютні кутові швидкості окремих елементів гірошпинделя.

Зовнішнє напівкільце обертається навколо осі Z з кутовою швидкістю $\overline{\omega}_1 = \alpha'$.

Внутрішня рамка виконує складний рух. Вона приймає участь в переносному русі разом з зовнішнім

напівкільцем і в відносному русі з кутовою швидкістю β' відносно зовнішнього напівкільця. Тому його абсолютна швидкість

$$\overline{\omega}_2 = \overline{\alpha'} + \overline{\beta'}$$

Виразимо абсолютну швидкість $\overline{\omega}_2$ в проєкціях на осі Резаля (осі Резаля зв'язані з внутрішньою рамкою).

Одержимо:

$$\overline{\omega}_{2x} = \beta', \quad \overline{\omega}_{2y} = \alpha' \sin \beta, \quad \overline{\omega}_{2z} = \alpha' \cos \beta.$$

Абсолютна кутова швидкість шліфувального круга визначається як сума двох переносних і відносної швидкості щодо внутрішньої рамки

$$\overline{\omega}_3 = \overline{\alpha'} + \overline{\beta'} + \overline{\gamma'}$$

Відповідно проєкції на осі Резаля (теорема Резаля) будуть мати вигляд:

$$\overline{\omega}_{3x} = \beta', \quad \overline{\omega}_{3y} = \alpha' \sin \beta + \gamma', \quad \overline{\omega}_{3z} = \alpha' \cos \beta.$$

Розрахуємо кінетичну енергію системи

$$T = \sum T_k (k = 1, 2, 3..n),$$

де k – нумерація елемента, що входить в гірошпиндель.

Кінетична енергія зовнішнього напівкільця

$$2T_1 = I_{1_{z_1}} (\alpha')^2$$

де $I_{1_{z_1}}$ – осьовий момент інерції зовнішнього напівкільця відносно осі $O_1Z_1/$

- Кінетична енергія внутрішньої рамки

Оскільки її конструкція має вісь симетрії, то головні осі інерції будуть направлені по осям Резаля.

$$2T_2 = I_{2_x} \times \beta'^2 + I_{2_y} (\alpha')^2 \sin^2 \beta + I_{2_z} (\alpha')^2 \sin^2 \beta$$

Для спрощення позначимо моменти інерції постійними величинами.

$$I_{2_x} = A_2, \quad I_{2_y} = B_2, \quad I_{2_z} = C_2.$$

Одержимо:

$$2T_2 = A_2 \times (\beta')^2 + B_2 (\alpha')^2 \sin^2 \beta + C_2 (\alpha')^2 \sin^2 \beta.$$

Кінетична енергія шпинделя (об'єднує шліфувальний круг, шпиндель, ротори електродвигунів).

$$2T_3 = A_3 \times (\beta')^2 + B_3 (\alpha' \sin \beta + \gamma')^2 + C_3 (\alpha' \cos \beta)^2$$

Складаючи кінетичну енергію всіх елементів гірошпинделя, одержимо вираз для T :

$$\begin{aligned} 2T_2 &= I_{1_{z_1}} (\alpha')^2 + A_2 (\beta')^2 + B_2 (\alpha')^2 \sin^2 \beta + \\ &+ C_2 (\alpha')^2 \cos^2 \beta + A_3 (\beta')^2 + B_3 (\alpha' \sin \beta + \gamma')^2 + \\ &+ C_3 (\alpha' \cos \beta)^2 = I_{1_{z_1}} (\alpha')^2 + (A_2 + A_3) (\beta')^2 + \\ &+ (C_2 + C_3) (\alpha' \cos \beta)^2 + B_2 (\alpha')^2 \sin^2 \beta + \\ &+ B_3 (\alpha' \sin \beta + \gamma')^2 \end{aligned}$$

Часткові похідні кінетичної енергії мають вигляд:

$$\frac{dT}{d\alpha'} = I_{1_{\alpha}} \alpha' + (C_2 + C_3) \alpha' \cos^2 \beta + B_2 \alpha' \sin^2 \beta + B_3 (\alpha' \sin \beta + \gamma') \sin \beta;$$

$$\frac{dT}{d\alpha} = 0$$

$$\frac{dT}{d\beta'} = \beta' (A_2 + A_3); \frac{dT}{d\beta} = (C_2 + C_3) (-\sin \beta) \alpha' \times \cos \beta + B_2 (\alpha')^2 \sin \beta \cos \beta + B_3 (\alpha' \sin \beta + \gamma') \times \alpha' \cos \beta;$$

$$\frac{dT}{d\gamma'} = B_3 (\alpha' \sin \beta + \gamma'), \frac{dT}{d\gamma} = 0$$

Після підстановки визначених часткових похідних в вихідні рівняння Лагранжа одержимо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} (I_{1_{\alpha}} \alpha' + (C_2 + C_3) \alpha' \cos^2 \beta + B_2 \alpha' \sin^2 \beta + B_3 (\alpha' \sin \beta + \gamma') \sin \beta) &= Q_{\alpha} \\ \frac{d}{dt} (\beta' (A_2 + A_3) - \alpha' \cos \beta \sin \beta (C_2 + C_3) - B_2 (\alpha')^2 \sin \beta \cos \beta - B_3 (\alpha' \sin \beta + \gamma') \alpha' \cos \beta) &= Q_{\beta} \\ \frac{d}{dt} (B_3 (\alpha' \sin \beta + \gamma')) &= Q_{\gamma} \end{aligned} \right\}$$

В рівняння входять узагальнюючі сили, які викликають рух елементів гірошпинделя. Для їх визначення необхідно розрахувати суму елементарних робіт діючих сил на можливих переміщеннях (поворотах) $\delta_{\alpha}, \delta_{\beta}, \delta_{\gamma}$.

До активних сил, що виконують роботу, необхідно зарахувати:

- силу ваги внутрішнього кільця P_b , прикладену до осі шпинделя на плечі «а» від осі OX ;
- силу ваги зовнішнього напівкільця P_n з плечем «b» від осі OZ ;

Маємо на увазі, що при врівноваженні названих елементів гірошпинделя відносно центра «О» величини плечей «а», «b» рівні нулю.

- сили, що виникають при шліфуванні в місці контакту круга і деталі, позначимо $P_{рад}, P_{піз}, P_x$.

- сила $P_{рад}$, забезпечує кругову подачу (обертання внутрішньої рамки). $P_{рад}$ прикладається до зовнішнього півкільця перпендикулярно його торцю.

З врахуванням діючих сил елементарні роботи становлять:

$$\begin{aligned} \delta A_{\alpha} &= M_z(\alpha) \delta_{\alpha} = -P_b \cos \alpha \times a \delta_{\alpha} + P_{рад} \cos \alpha \times d \times \delta_{\alpha} - P_H \cos \alpha \times b \times \delta_{\alpha} = \\ &= (-P_b \times a + P_{рад} \times d - P_H \times b) \cos \alpha \times \delta_{\alpha}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta A_{\beta} &= M_x(\beta) \delta_{\beta} = P_x \times R_{кр} \times \delta_{\beta} + P_{рад} \times C \times \delta_{\beta} = (P_x \times R_{кр} + P_y \times C) \times \delta_{\beta}; \end{aligned}$$

$$\delta A_{\gamma} = M_y(\gamma) \delta_{\gamma} = P_{піз} \times R_{кр} \times \delta_{\gamma}$$

Остаточо

$$Q_{\alpha} = (-P_b \times a + P_{рад} \times d - P_H \times b) \cos \alpha,$$

$$Q_{\beta} = P_x \times R_{кр} + P_{рад} \times C,$$

$$Q_{\gamma} = P_{піз} \times R_k$$

При роботі шліфувального круга на номінальних обертах електромагнітний момент двигунів буде урівноважуватись моментами сил опору. Тому

$$Q_{\gamma} = 0$$

Розрахунок параметрів гірошпинделя

Для вирішення рівнянь руху гірошпинделя, одержаних на основі метода Лагранжа, необхідно визначити параметри, що характеризують конкретні розміри, зокрема лінійні, радіусні окремих елементів і на цій основі визначити коефіцієнти А, В, С, що являються осьовими моментами інерції елементів.

При виконанні цієї операції необхідно визначити конфігурації елементів, центри їх мас і відстані до відповідних осей.

- Зовнішнє напівкільце складається з валу (ділянки циліндра) і напівкільця.

При роботі гірошпинделя напівкільце може виконувати коливальний рух навколо осі OZ_1 .

Його момент інерції рівний сумі двох моментів: вала I_{bz_1} і напівкільця I_{hkz_1} .

Момент інерції круглого циліндра рівний

$$M_{bz_1} = \frac{1}{2} m_b \cdot \frac{d^2}{u} = \frac{1}{2} \frac{\pi d^2}{4} \cdot l \gamma \cdot \frac{d^2}{4} = \frac{\pi d^4 \cdot l \gamma}{32}$$

(тут: d – діаметр, l – довжина, γ – питома вага).

Виділим на напівкільці елемент dz_1 масою $\frac{m_{нк}}{\pi R}$.

Його маса визначиться, як $dm = \frac{m_{нк}}{\pi R} dz_1$.

Координати елемента dz_1 x_1 і z_1 . Для кола $x_1^2 + z_1^2 = R^2$. Величина x_1 змінюється від 0 до R .

$$I_{nkz_1} = \int_0^R (R^2 - z_1^2) \frac{m_{нк}}{\pi R} \cdot dz_1 = \frac{2}{3} \frac{m_{нк}}{\pi} \cdot R^2.$$

Тут: $m_{нк} = b \cdot \pi R \cdot \gamma$.

$$I_{nkz_1} = \frac{2}{3} R^3 \cdot b \cdot c \gamma.$$

$b \cdot c \gamma$.

Момент інерції зовнішнього напівкільця:

$$I_{3H} = \frac{\pi d^4 l \gamma}{32} + \frac{2}{3} \cdot R^3 \cdot b \cdot c \cdot \gamma$$

- Визначення моменту інерції внутрішньої рамки.

Конструктивно рамка являє собою прямокутник з розмірами $2B \times 2H$. Посередині сторони В зверху і знизу є два циліндричні обертача діаметром d_n і довжиною l_n .

Посередині сторони Н прикріплені два електродвигуни, їх розміри d_{en} і l_{en} .

Необхідно визначити осьові моменти інерції рамки відносно осей x, y, z .

Відносно осі x .

$$I_{2x} = I_{2x_{рам}} + I_{2x_{нар}} + I_{2x_{ел}}$$

(індекс «2» придано внутрішній рамці, як складовій шпинделя).

$$I_{2x_{рам}} = I_{2_{1x}} + I_{2_{2x}} + I_{2_{3x}} + I_{2_{4x}}$$

де 1, 2, 3, 4 – складові.

На основі [] одержимо:

$$I_{2_{1x}} = I_{2_{2x}} = \frac{1}{3} \cdot m_1 (b^2 + h^2) + m_1 \cdot B^2$$

Відповідно:

$$I_{2_{3x}} = I_{2_{4x}} = \frac{1}{12} \cdot m_3 (2B)^2$$

(вісь проходить через центр ваги).

Моменти інерції обертачів:

$$I_{2x_{нар}} = \frac{m_{нар} \cdot d_n^2}{8}$$

Моменти інерції електродвигунів визначаємо інтегруванням.

$$\text{Одержимо: } I_{2x_{ел}} = \pi \cdot r_{ел}^2 \gamma \left[\frac{(B+l_{ел})^3}{3} - \frac{B^3}{3} \right]$$

Сумарний момент складає:

$$I_{2x} = \frac{2}{3} \cdot m_1 (b^2 + h^2) + 2m_1 \cdot B^2 + \frac{1}{6} \cdot m_3 (2B)^2 + \frac{m_{нар} \cdot d_n^2}{4} + 2\pi \cdot r_{ел}^2 \gamma \left[\frac{(B+l_{ел})^3}{3} - \frac{B^3}{3} \right]$$

Відносно осі y.

$$I_{2y} = I_{2y_{рам}} + I_{2y_{нар}} + I_{2y_{ел}} = \frac{2}{3} \cdot m_3 (b^2 + h^2) + m_3 H^2 \cdot 2 + \frac{1}{6} \cdot m_1 (2H)^2$$

Відносно осі z.

$$I_{2z} = I_{2z_{рам}} + I_{2z_{нар}} + I_{2z_{ел}}$$

- Враховуючи конфігурацію елементів і положення осі z відносно них, одержимо:

$$I_{2z} = \frac{1}{3} (H^2 + B^2) (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) + \frac{1}{2} m_{ел} \left(\frac{1}{3} l_{ел} + r_{ел} \right) + m_{ел} \left(B + \frac{l_{ел}}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} m_{нар} \left(\frac{1}{3} l_n^2 + r_n^2 \right) + m_{нар} \left(H + \frac{l_n}{2} \right)$$

- Визначення моменту інерції шліфувального круга і шпинделя.

Відносно осі x.

$$I_{3x} = I_{кр} + I_{ун} = \frac{1}{4} m_{кр} \left(\frac{1}{3} B_{кр}^2 + \frac{D_{кр}^2}{4} \right) + \frac{1}{12} m_{ун} \cdot l_{ун}^2$$

Відносно осі y.

$$I_{3y} = \frac{1}{2} m_{кр} \cdot R_{кр}^2 + \frac{1}{2} m_{ун} \cdot r_{ун}$$

Відносно осі z.

$$I_{3z} = I_{3z_{ун}} + I_{3z_{кр}}$$

$$I_{3z_{ун}} = \frac{1}{4} m_{ун} \left(\frac{1}{3} l_{ун}^2 + r_{ун}^2 \right),$$

$$I_{3z_{кр}} = \frac{1}{4} m_{кр} \left(\frac{1}{3} B_{кр}^2 + R_{кр}^2 \right) - \frac{1}{4} m_{кр.вн} \left(\frac{1}{3} B_{кр}^2 + R_{кр.вн}^2 \right).$$

Висновки по підрозділам:

Визначена математична модель гірошпинделя. Представлена методика розрахунку параметрів, які входять в розроблену математичну модель.

Список літератури

1. Авторское свидетельство СССР, SU №1664469 А1, кл. В2КК 19/00, 1991
2. GARANT: Справочник по обработке резанием [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.garant-tools.com.
3. Кувшинский В. В. Фрезерование / В. В. Кувшинский. – М. : Машиностроение, 1977. – 240 с.
4. Ящерицын П. И. Основы резания материалов: учебное пособие / П. И. Ящерицын, В. Д. Ефремов. – Минск : БГАТУ, 2008. – 644 с.
5. Скоркін А. О. Підвищення ефективності протягування за рахунок косокутного різання в зоні деформування / А. О. Скоркін [та ін.] // Машинобудування : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2017. – № 20. – С. 41-47.
6. Шпур Г. Справочник по технологии резания металлов. В 2-х кн. Книга 1 : [перевод с нем.] / Г. Шпур, Т. Штеферле. – М. : Машиностроение, 1985. – 616 с.
7. Шаламов В. Г. Кинематика ротационного и традиционного резания / В. Г. Шаламов, С. Д. Сметанин, М. Н. Гатитюлин // Известия Челябинского научного центра. – 2009. – Вып. 3 (45). – С. 13-17.
8. Артамонов Е. В. Расчет и проектирование сменных режущих пластин и сборных инструментов / Е. В. Артамонов, Т. Е. Помигалова, М. Х. Утешев; под общей ред. М. Х. Утешева. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. – 152 с.
9. Андреев В. Н. Совершенствование режущего инструмента / В. Н. Андреев. – М. : Машиностроение, 1993. – 240 с.
10. Баранчиков В. И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания материалов: справочник / В. И. Баранчиков. – М. Ж Машиностроение, 1990. – 400 с.: ил.

References (transliterated)

1. USSR author's certificate, SU №1664469 А1, cl. В2КК 19/00, 1991
2. GARANT : Spravochnik po obrabotke rezaniem n.d., viewed, www.garant-tools.com
3. Kuvshinskij, VV 1977, *Frezzerovanie*, Mashinostroenie, Moskva.
4. Jashhericyн, PI & Efremov, VD 2008, *Osnovy rezanija materialov*, Belorusskij gosudarstvennyj agrarnyj tehničeskij universitet, Minsk.
5. Skorkin, AO, Shelkovic, OM, Permjakov, OA & Kondratjuk, OL 2017, 'Pidvishennja efektyvnosti protjaguvannja za rahunok kosokutnogo rizannja v zoni deformuvannja' *Mashinobuduvannja*, Ukrainska inzhenerno-pedahohična akademiia, Kharkiv, no. 20, pp. 41-47
6. Shpur, G & Shteferle, T 1985, *Spravochnik po tehnologii rezanija metallov*, Book 1, Mashinostroenie, Moskva.
7. Shalamov, VG, Smetanin, S D & Gatitulyn, MN 2009, 'Kinematika rotacionnogo i tradicionnogo rezanija', *Izvestija Cheljabinskogo naučnogo centra*, iss. 3 (45), pp. 13-17.
8. Artamonov, EV, Pomigalova, TE & Utesheva, MH 2011, *Raschet i proektirovanie smennyh rezhushhijh plastin i sbornyh instrumentov*, Tjumenkij gosudarstvennyj neftegazovyj universitet, Tjumen.
9. Andreev, VN *Sovershenstvovanie rezhushhego instrumenta*, Mashinostroenie, Moskva.
10. Baranchikov, VI *Progressivnye rezhushhie instrumenty i režimy rezanija materialov*, Mashinostroenie, Moskva.

Поступила (received) 23.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Скоркін Антон Олегович (Скоркин Антон Олегович, Anton Skorkin) – канд. техн. наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), м. Харків, e-mail: Andromeda862@ukr.net

Кондратюк Олег Леонідович (Кондратюк Олег Леонидович, Oleh Kondratiuk) – канд. техн. наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), м. Харків, e-mail: kondr20071@i.ua;

Старченко Олена Павлівна (Старченко Елена Павловна, Olena Starchenko) – заступник директора з навчальної роботи, Харківський радіотехнічний технікум, м. Харків, e-mail: Estarchenko79@gmail.com;

Протопопова Анастасія Сергіївна (Протопопова Анастасия Сергеевна, Anastaciia Protopopova) – студентка факультету Комп'ютерних і інтегрованих технологій в виробництві і освіті, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), м. Харків, e-mail: Andromeda862@ukr.net;

С.В. КОВАЛЕВСЬКИЙ, О.С. КОВАЛЕВСЬКА

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕХАНООБРОБКИ

Представлена концепція забезпечення додатковими ресурсами оптимального технологічного процесу виходячи з величини максимального прибутку, яка утворюється як різниця ринкової ціни і витрат на виготовлення продукції. Показана можливість досягнення ефекту підвищення експлуатаційних показників деталей при комбінованому впливі слабких енергетичних джерел, таких, як польові (магнітне поле) в резонансному режимі з оброблюваною поверхнею, що утворює резонансний електромагнітний контур з параметрами режимів обробки поверхні деталі. Наведено опис схеми отримання обертового магнітного поля за умови досягнення електромагнітного резонансу технологічної системи. Показана методика прискорених випробувань обробленої поверхні на зносостійкість. Дано результати експериментальних досліджень на прикладі обробки обертовим магнітним полем в резонансному режимі з додатковим створенням середовища, що вводиться між джерелом магнітного поля і робочою поверхнею деталі. Як проміжне середовище використаний водний розчин фтористого калію як епіламіруючої речовини. Показано, що обертове магнітне поле, як додаткове джерело енергії здатне активувати епіламіруючу середу.

Ключові слова: технологічна система, якість, оптимізація, обертове магнітне поле, резонанс, епіламірування, зносостійкість, випробування на знос.

С.В. КОВАЛЕВСКИЙ, Е.С. КОВАЛЕВСКАЯ

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНООБРАБОТКИ

Представлена концепция обеспечения дополнительными ресурсами оптимального технологического процесса исходя из величины максимальной прибыли, которая образуется как разность рыночной цены и затрат на изготовление продукции. Показана возможность достижения эффекта повышения эксплуатационных показателей деталей при комбинированном воздействии слабых энергетических источников, таких, как полевые (магнитное поле) в резонансном режиме с обрабатываемой поверхностью, образующей резонансный электромагнитный контур с параметрами режимов обработки поверхности детали. Приведено описание схемы получения вращающегося магнитного поля при условии достижения электромагнитного резонанса технологической системы. Показана методика ускоренных испытаний обработанной поверхности на износостойкость. Даны результаты экспериментальных исследований на примере обработки вращающимся магнитным полем в резонансном режиме с дополнительным созданием среды, вводимой между источником вращающегося магнитного поля и рабочей поверхностью детали. В качестве промежуточной среды использован водный раствор фтористого калия как эпиллирующего вещества. Показано, что вращающееся магнитное поле, как дополнительный источник энергии способно активировать эпиллирующую среду.

Ключевые слова: технологическая система, качество, оптимизация, вращающееся магнитное поле, резонанс, эпиллирование, износостойкость, испытания на износ.

S. KOVALEVSKYY, O. KOVALEVSKA

IMPROVING THE QUALITY OF TECHNOLOGICAL SYSTEM OF MECHANICAL PROCESSING

The concept of providing additional resources for the optimal technological process is presented on the basis of the maximum profit, which is formed as the difference between the market price and the cost of manufacturing products. It is shown that it is possible to achieve the effect of increasing the operational performance of parts under the combined effect of weak energy sources, such as field (magnetic field) in a resonant mode with a surface to be treated, forming a resonant electromagnetic circuit with parameters of the surface treatment of the part. A description is given of the scheme for obtaining a rotating magnetic field under the condition that the technological system achieves electromagnetic resonance. The technique of accelerated wear resistance testing of the surface is shown. The results of experimental studies are given on the example of processing a rotating magnetic field in a resonant mode with additional creation of the medium introduced between the source of the rotating magnetic field and the working surface of the part. An aqueous solution of potassium fluoride was used as an intermediate medium as an epilating agent. It is shown that a rotating magnetic field, as an additional source of energy, is capable of activating an epilating medium.

Keywords: technological system, quality, optimization, rotating magnetic field, resonance, epilation, wear resistance, wear tests.

Вступ. Основною парадигмою технології машинобудування є створення таких технологічних процесів, які дозволили б виготовляти вироби з необхідною якістю в заданій кількості за певний час. При цьому повинен бути досягнутий економічний результат у вигляді бажаного прибутку підприємства-виробника машини.

Все це характеризує важливі властивості системи, що розвивається – цілісність і прагнення до динамічної рівноваги, які слід враховувати у технологічному процесі.

Будь-яка створена машина має своєю метою брати участь у системі економічних відносин і тому підпорядкована основній вимозі – створювати передумови для формування товарних властивостей виробу. Товарні властивості виробу проявляються в кінцевому підсумку прибутку, як різниці між ціною виробу і собівартістю її виготовлення в сукупності з витратами на підтримку працездатності виробу в

період усього його життєвого циклу [1].

У цих умовах прагнення до отримання максимального прибутку виробника неодмінно має супроводжуватися досягненням оптимального рівня витрат на виробництво продукції.

Як видно з представленої схеми формування прибутку виробника в координатах «якість – витрати», максимального прибутку відповідає цілком певний (але не мінімальний!) рівень якості Q_0 . Таким чином, для забезпечення заданого рівня якості необхідно затратити певний рівень ресурсів. Умова «витратити, щоб отримувати більше» набуває сенсу і стимулу для постійного нарощування технологічного потенціалу. Однак цей стимул не може бути як завгодно високого рівня [2].

Такий підхід робить важливим постійний моніторинг технологічних досягнень та створення умов для впровадження нових технологічних процесів з оптимальним застосуванням ресурсів.

© С.В. Ковалевський, О.С. Ковалевська, 2019

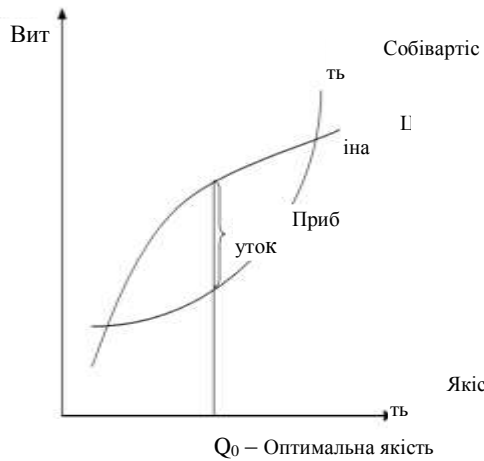


Рисунок 1 – Формування оптимального якісного показника виробу

Якщо витрати на використання ресурсів для здійснення технологічних процесів можуть служити характеристикою їх обмежень, то рівень таких витрат можна забезпечити на основі аналізу існуючих процесів і сформуванню обмежень для забезпечення показників якості робочих поверхонь виробів.

На основі викладеного актуалізовані спеціальні методи обробки робочих поверхонь виробів з ціллю забезпечення їх конкурентних властивостей, і контролю їх якості [3]. Основні ознаки таких технологічних методів, на наш погляд, заключенні в:

-застосуванні мало витратних, з точки зору використання ресурсів, способів впливу на робочі поверхні деталей машин (фізичних і хімічних ефектів і явищ, таких, наприклад, як резонанс, капілярний ефект і т. ін.);

-застосуванні локального перенесення енергії (скін-ефект, струми Фуко і т. ін.);

-використанні явищ, що дозволяють відмовитися від створення дорогих ізольованих просторів (шнур коронного розряду, розряд у технологічному середовищі тощо);

-діагностики процесів на основі власних коливань об'єктів.

Безумовно, перераховані напрями не є вичерпними, проте їх висвітлення в даній роботі, зроблене на основі результатів досліджень авторів.

Мета роботи – надати системний приклад вирішення задачі розробки нового технологічного способу створення функціональних робочих поверхонь деталей машин.

Основна частина. Традиційне поняття «технологічна система» включає в себе чотири складових – верстат, пристосування, інструмент і деталь, взаємний вплив цих складових визначають якість, точність і економічність оброблення деталей машин традиційними методами оброблення. Але, з точки зору створення та використання інтегрованих технологічних процесів, доцільно доповнити це речення, яке відображається модифікованою схемою

технологічної системи (рис.2). Під чинником «інструмент» розуміється об'єкт, за допомогою якого відбувається вплив на деталь, об'єкт, який виступає в ролі інструменту. Умовно «інструмент» можна розділити на інструмент, який у процесі впливу дозволяє знімати шар матеріалу і який у процесі оброблення впливає без зняття шару матеріалу. «Інструмент», який дозволяє знімати шар матеріалу, – є різальним інструментом. «Інструмент», який в ході операції впливає на деталь без зняття шару матеріалу, можна представити у вигляді «електроду», як переноснику джерела енергії, та «тіло», як безпосередньо діючого на шар робочої поверхні заготовки без зняття шару.

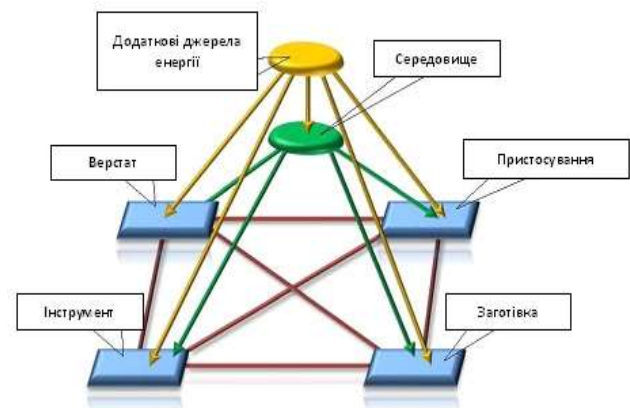


Рисунок 2 – Схема технологічної системи

Це може бути вигладжувачем, обкатним роликком, ПАР (поверхнево-активною речовиною), МОР (мастильно-охолоджувальною речовиною) і т.ін.. Чинник «верстат» в схемі узагальнює устаткування, яке забезпечує впливові технологічні дії, що виконуються в технологічних операціях. Чинники «пристосування» і «заготовка» - традиційні. Але, чинники «середовище» і «додаткові джерела енергії» відображають речові, енергетичні і організаційні впливові дії.

Такі уявлення стосовно розгорнутій схемі технологічної системи відображають триєдність матерії, енергії та інформації. Наступні приклади ілюструють можливість побудови технологічних систем з запропонованим підходом.

Зменшення зносу робочих поверхонь деталей машин залежить від властивостей створених функціональних поверхонь. Формування таких властивостей, згідно уявленням рис.1, може здійснюватися за допомогою чинників «середовище» - епіламіруючої речовини і «додаткові джерела енергії» - обертового магнітного поля.

Збільшенню зносостійкості виробів сприяє їх конструктивне і технологічне вдосконалення (компенсація зношування, його рівномірний розподіл по поверхні, підвищення твердості, поверхневе гартування, хіміко-термічна обробка та ін.), створення умов, що знижують тертя деталей [4].

Застосування різних активацій дає позитивні

результати: вплив на адсорбцію, формування рівномірного моношару і хемосорбцію, зміна в фазовому стані і фізико-механічній природі матеріалів, прискорення дифузійних і адгезійних процесів, сприяє зменшенню зерна у сплавів, активує просторово-періодичні структури композицій.

Поряд з цим, магнітне поле являє собою один з видів матерії, яке проявляє себе у вигляді електромагнітних сил, що діють на окремі рухомі електричні заряди (електрони і іони) і на їх потоки, тобто електричний струм [5].

За допомогою дії магнітного поля поліпшують властивості бурових коронок [6], плоских поверхонь деталей машин [7], лезвійних ріжучих інструментів [8,9,10,11,12], динамічно навантажених деталей машин [8], зубчатих коліс та шестернь [9, 10] симетричних деталей машин (вали, осі, підшипники, штоки та ін.) [9], різьбових кріпильних деталей (болти, шпильки, гайки та ін.) [10], ресор та пружин [10,13]. Також магнітне поле використовують для утворення внутрішніх поверхонь обертаня [14,15], для зміцнення залізничних коліс, у будівництві для покращення бетонних та будівельних споруд і т.ін..

Для надання очікуваних результатів обробки деталей разом з впливом магнітного поля використовують поверхнево пластичне деформування [7], імпульсне зміцнення [10,12,14,16], вібродинамічне накопчування [15], галтовку [13,17,18], полірування [0], плазмо-дуговий розряд, середовище рідкого азоту [6].

Авторами сформульована гіпотеза про те, що застосування активації епіламіровання за допомогою обертового магнітного поля, вплине на процес утворення функціональної поверхні, відбудеться поглинання енергії та зміна орієнтації магнітного моменту елементів поверхні шляхом введення збуджуючого поля змінної частоти [19].

Дослідження впливу активізації епіламіровання обертовим магнітним полем виконувалися на основі оцінки значень твердості, вимірної твердоміром ЕТМ-01; знос – на основі оцінки ширини смуги, залишеної сферичним індентором за спеціально розробленим методом.

Інструмент представляє собою чотири магнітопроводи, кінці якого зведено в одну точку, з обмотками, струми яких зміщенні на 90° послідовно (рис.3).

Синусоїдальний струм у кожній з чотирьох обмоток, з'єднаних згідно принципової схеми рис.4, утворює обертове магнітне поле.

Кількість витків кожної обмотки $N=3500$ мідного проводу діаметром 0,1 мм при довжині обмотки $l=43$ мм, зовнішньому діаметру обмотки $D=10$ мм. Ємкість одного із трьох підключених конденсаторів $C=32$ мкФ.

Резонансна частота кожного коливального контуру визначена за формулою (1) [14]:



Рисунок 3 – Загальний вид інструменту – утворювачу обертового магнітного поля

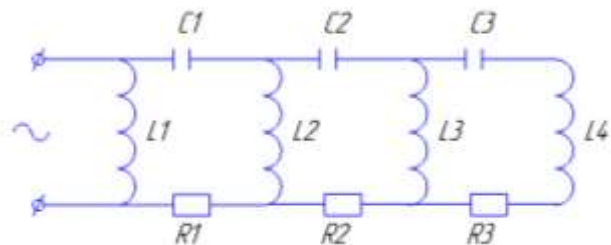


Рисунок 4 – Принципова схема створення обертового магнітного поля

$$f_{i=1...4} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_i \cdot C}}, \quad (1)$$

$$\text{де } L = \frac{\left(\frac{D}{10}\right)^2 \cdot N^2}{(4,5 \cdot D) + (10 \cdot l)}$$

і складає $f = 200$ Гц.

Ця резонансна частота пристрою, що дозволяє отримувати обертове магнітне поле, повинна бути узгоджена між резонансною частотою індуктивного контуру L обмотки «джерело обертового магнітного поля» («ДОМП») з підстроюванням ємністю C і контуру: «ДОМП» - «заготівка» - ємність повітряного зазору між магнітопроводами і заготівкою. В якості епіламіруючої речовини обрано хімічне з'єднання фтористий калій KF, властивості якого представлено у таблиці 1.

Основною перевагою при виборі даного з'єднання є його спроможність проявляти діамагнітні властивості, які проявляються у намагнічені речовини назустріч напрямку діючого на нього зовнішнього магнітного поля. Кристалічний вид розчину для подальшого використання розводимо дистильованою водою, у співвідношенні, який призведе до переходу у рідкий стан.

Таблиця 1 – Властивості епіламіруючої речовини KF

Фізичні властивості	
Молярна маса	58,10 г/моль
Щільність	2,481 г/см ³
Термічні властивості	
Т. плав.	846 °С
Т. кип.	1502 °С
Термодинамічні параметри	
Ентальпія утворення	-567,4 кДж/моль
Ентропія утворення	66,6 Дж/(моль·К)
Ентальпія плавлення	28,5 кДж/моль
Ентальпія кипіння	172,8 кДж/моль
Теплоємність	49,32 Дж/(моль·К)

Джерелом подачі напруги ($U=60V$) та контролю частоти в експериментальній установці використано генератор імпульсів Г5-54.

За результатами досліджень зі змінними часу та частоти струму, отримано результати виміру твердості. (рис. 5).

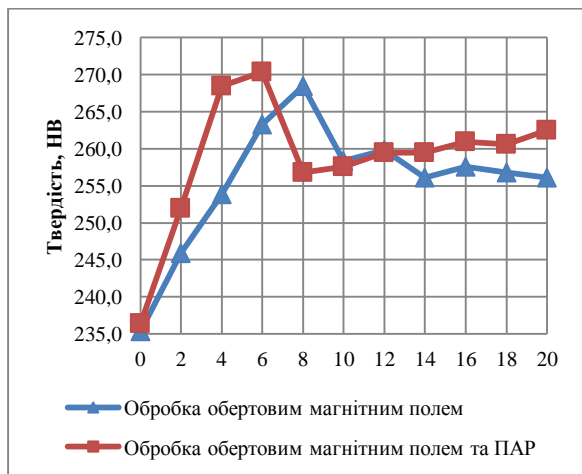


Рисунок 5 – Графік залежності твердості від тривалості обробки при різному способу зміцнення

Вплив обробки обертовим магнітним полем досліджений на зразках, що покриті після обробки шаром 4 мкм. анілінового барвнику з наступним впливом сферичним індентором. Ширина сліду дозволяє прискорено виконувати порівняльний аналіз проведеної обробки с магнітним полем без і з використанням епіламіруючої речовини (рис.6).

Висновки. На підставі гіпотези об узагальненому представленні технологічної системи і результатах експериментальних досліджень можна стверджувати, що безконтактна обробка обертовим магнітним полем дозволяє розширити уявлення о можливості отримувати позитивні зміни якості поверхневого шару за рахунок впливу обертового магнітного поля, який полягає у підвищенні твердості та зносостійкості поверхневого шару деталі.

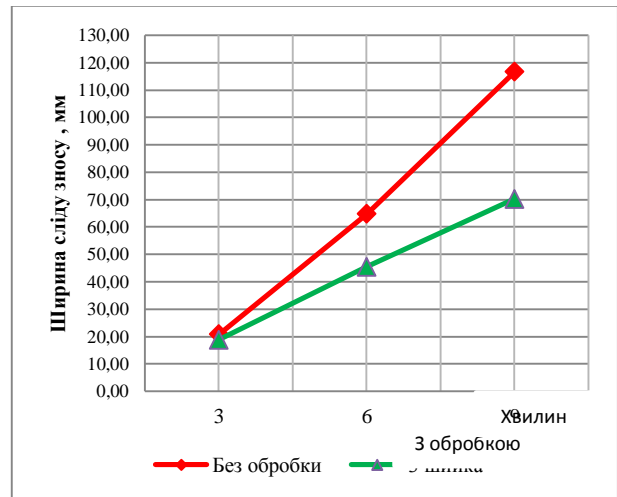


Рисунок 6 – Залежність ширини сліду зносу поверхні від тривалості випробування

Встановлено, що є екстремальні значення показників при обробці в умовах резонансу частоти обертового магнітного поля та власної частоти обробки поверхні. Таким чином гіпотеза підтверджена результатами експерименту: підвищення зносостійкості поверхонь тертя при 3 хвилинах випробування – в 1,1...1,2 раз, при 6 хвилинах – в 1,3...1,4 раз, при 9 хвилинах – в 1,5...1,6 раз. Аналогічні дослідження, що проведені авторами над заготовками з матеріалів Ст40Х, ШХ15, 30ХГСА також показали позитивний вплив на показники зносостійкості обробленої обертовим магнітним полем без використання речовини KF.

Список літератури

1. *Нейросетевые технологии в технологической подготовке производства : монография* / С. В. Ковалевский, В. Б. Гитис, Е. В. Мишура, В. Б. Мишура. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 144 с.
2. Ковалевський С. В. *Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин : монография* / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов. – Краматорск : ДДМА, 2012. – 100 с.
3. *Нові комбіновані методи обробки робочих поверхонь деталей машинобудування (із застосуванням нейросітьового аналізу) : монография* / С. В. Ковалевський, С. Г. Онищук, В. І. Тулупов, І. М. Стародубцев. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – 196 с.
4. *Надійність та експлуатація гідромашин та гідроприводів : навч. посіб.* / З. Л. Фінкельштейн, П. М. Андренко, О. В. Дмитрієнко; Під. ред. П.М. Андренко. – Алчевськ: ДонДТУ, 2013. – 142 с.
5. Усольцев А.А. *Общая электротехника: Учебное пособие.* – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.
6. Третьяк А.А. *Технология упрочнения буровых коронок*// Горный информационно-аналитический бюллетен. 2016. №10. с. 121-130.
7. Баранов С.А., Фокин В.Д., Зенова В.И., Сухоцкий С.А *Обработка поверхностным пластическим деформированием плоских поверхностей деталей машин*// Электронный научно-технический журнал «Студенческий вестник», Октябрь – 2017.
8. Полетаев В.А. *Упрочнение сверл из быстрорежущей стали импульсной магнитной обработкой*// Технические науки №73-1, 08.11.2017.-С.44-47.
9. Полетаев В.А., Покровский А.А. *Возможности магнитной обработки и магнитных установок*// Технические науки №82-1, 09.04.2018. – С.27-29.
10. Полетаев В.А. *Исследование механических свойств деталей,*

- обработанных импульсным магнитным полем// Технические науки №77-1, 16.01.2018. – С.71-75
11. Поletaev V.A. Упрочение сверл импульсной магнитной обработки// Технические науки №77-1, 16.01.2018. – С.79-82
 12. Поletaev V.A., Марков М.Г., Красильникьянц Е.В., Орлов А.С. Импульсная магнитная установка для упрочнения режущих инструментов //Вестник ИГЭУ. – 2011. — Вып. 4. — С. 35–39
 13. Поletaev V.A., Чернов Л.К. Использование магнитного поля для передачи формообразующего движения на обрабатываемую поверхность// Технические науки №73-1, 08.11.2017. – С.51-55.
 14. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. — 12-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2014. — 317 с.
 15. Довгалев А.М. Совмещенная отделочно-упрочняющая обработка деталей машин вибродинамическим накатыванием и вращающимся магнитным полем // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. №4 (53) – с.15-23.
 16. Алифанов А.В., Попова Ж.А., Ционенко Н.М. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле // Литье и металлургия №4(68) – 2012, с.151- 155.
 17. Поletaev V.A. Магнитное поле как средство передачи формообразующего движения на обрабатываемую поверхность // Технические науки №54-2, 07.11.2016. С.16-21.
 18. Поletaev V.A., Киселев В.В. Схемы расположения магнитов в магнитно-абразивном устройстве // Технические науки №85-2, 29.05.2018.-С.30-32.
 19. Ковалевський С.В., Глушич К.С. Удосконалення робочих поверхонь деталей машин методом епіламування. / «Молода наука – прогресивні технологічні процеси, технологічне обладнання і оснащення» збірник всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю – Краматорськ: ДДМА, 2018. –95 С.
- References (transliterated)**
1. S. V. Kovalevskij, V. B. Gitis, E. V. Mishura, V. B. Mishura Nejrosetevy'e tekhnologii v tekhnologicheskoy podgotovke proizvodstva : monografiya [Neural network technologies in the technological preparation of production: a monograph] Kramatorsk. DGMA, 2010. 144 p.
 2. Kovalevskij S. V., Tulupov V. G. Speczi'al'ni`metodi obroblyennya robochikh poverkhon`detalej mashin : monografiya [Special methods of working surfaces of machine parts: monograph] Tulupov. Kramatorsk, DDMA, 2012. 100 p.
 3. Kovalevskij S. V., Onishhuk S. G., Tulupov V. G., Starodubczev G. M. Novi`kombinovani`metodi obrobki robochikh poverkhon`detalej mashinobuduvannya (i`z zastosuvannjam nejrosi`t`ovogo anali`zu) : monografiya [New Combined Techniques for Machining Working Parts of Mechanical Engineering Parts (Using Neural Network Analysis): Monograph]. Kramatorsk, DDMA, 2013. 196 p.
 4. Fi`nkel`shtejn Z. L., Andrenko P. M., Dmitri`yenko O. V. Nadi`jni`st`ta ekspluatatsi`ya gi`dromashin ta gi`droprivodi`v : navch. posi`b [Reliability and Operation of Hydro Machines and Hydraulic Drives: Tutorial. tool] Alchevs`k: DonDTU, 2013. 142 p.
 5. Usol`czev A.A. Obshhaya e`lektrotehnika: Uchebnoe posobie [General Electrical Engineering: Study Guide] SPb, SPbGU ITMO, 2009. 301p.
 6. Tret`yak A.A. Tekhnologiya uprochneniya burovy`kh koronok [Drill bit hardening technology] Gorny`j informacziorno-analiticheskij byulleten. 2016, No10, pp. 121-130.
 7. Baranov S.A., Fokin V.D., Zenova V.I., Sukhoczkij S.A Obrabotka poverkhnostny`m plasticheskim deformirovaniem ploskikh poverkhnostej detalej mashin [Surface plastic deformation processing of flat surfaces of machine parts] E`lektronny`j nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Studencheskij vestnik», Oktyabr` 2017.
 8. Poletaev V.A. Uprochnenie sverl iz by`strozehushhej stali impul`snaj magnitnoj obrabotkoj [Hardening of high speed steel drills by pulsed magnetic treatment] Tekhnicheskie nauki No73(1), pp.44-47.
 9. Poletaev V.A., Pokrovskij A.A. Vozmozhnosti magnitnoj obrabotki i magnitny`kh ustanovok [Possibilities of magnetic processing and magnetic installations] Tekhnicheskie nauki No82(1), pp. S.27-29.
 10. Poletaev V.A. Issledovanie mekhanicheskikh svojstv detalej, obrabotanny`kh impul`sny`m magnitny`m polem [The study of the mechanical properties of parts treated with a pulsed magnetic field] Tekhnicheskie nauki No77(1), pp.71-75
 11. Poletaev V.A. Uprochnenie sverl impul`snaj magnitnoj obrabotki [Hardening drill pulsed magnetic processing] Tekhnicheskie nauki No 77(1), pp.79-82
 12. Poletaev V.A., Markov M.G., Krasil`nik`yancz E.V., Orlov A.S. Impul`sная магнитная установка для упрочнения режущих инструментов [Impulse magnetic installation for hardening cutting tools] Vestnik IGE`U. 2011. Vol. 4. pp. 35–39.
 13. Poletaev V.A., Chernov L.K. Ispol`zovanie magnitnogo polya dlya peredachi formoobrazuyushhego dvizheniya na obrabaty`vaemuyu poverkhnost` [The use of a magnetic field to transfer the shaping movement to the work surface] Tekhnicheskie nauki No73(1), pp.51-55.
 14. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy` e`lektrotekhniki. E`lektromagnitnoe pole : uchebnik dlya bakalavrov [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field: a textbook for bachelors] 12-e izd., ispr. i dop. Moscow : Izdatel`stvo Yurajt, 2014. 317 p.
 15. Dovgalev A.M. Sovmeshhennaya otdelchno-uprochnyayushhaya obrabotka detalej mashin vibrodinamicheskim nakaty`vaniem i vrashhayushhimysya magnitny`m polem [Combined finishing and hardening processing of machine parts by vibrodinamic rolling and a rotating magnetic field] Vestnik Belorussko- Rossijskogo universiteta. 2016. No4 (53). pp.15-23.
 16. Alifanov A.V., Popova Zh.A., Czionenko N.M. Mekhanizm uprochneniya legirovanny`kh staley v impul`snom magnitnom pole [The hardening mechanism of alloy steels in a pulsed magnetic field] Lit`e i metallurgiya No4(68), 2012, pp.151- 155.
 17. Poletaev V.A. Magnitnoe pole kak sredstvo peredachi formoobrazuyushhego dvizheniya na obrabaty`vaemuyu poverkhnost` Tekhnicheskie nauki No54-2, 07.11.2016. pp.16-21.
 18. Poletaev V.A., Kiselev V.V. Skhemy` raspolozheniya magnetov v magnitno-abrazivnom ustrojstve. Tekhnicheskie nauki No85-2, 29.05.2018. pp.30-32..
 19. Kovalevskij S.V., Glushich K.S. Udoskonalennya robochikh poverkhon` detalej mashin metodom epi`lami`rovannya. / «Moloda nauka – progresivni` tekhnologi`chni` procеси, tekhnologi`chne obladnannya i` osnashhennya» zbi`rnik vseukrayins`koyi naukovotekhnichnoyi konferenczi`yi z mi`zhnarodnoyu uchastyu – Kramators`k: DDMA, 2018. 95 p.

Надійшла (received) 24.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковалевський Сергій Вадимович (Ковалевский Сергей Вадимович, Serhiy Kovalevskyy) – доктор технічних наук, професор, кафедра технології машинобудування ДДМА; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4708-4091>; e-mail: kovalevskii@dgma.donetsk.ua

Ковалевська Олена Сергіївна (Ковалевская Елена Сергеевна, Olena Kovalevska) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5884-0430>; e-mail: olenakovalevskaya@gmail.com

Я. Б. НЕМИРОВСКИЙ, Э. К. ПОСВЯТЕНКО, И. Ю. РОСТОЦКИЙ, Ю. А. ЦЕХАНОВ

ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ДЕФОРМИРУЮЩЕМ ПРОТЯГИВАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОК

В статье приведены результаты изучения контактных явлений при деформирующем протягивании с использованием твердых смазок. Показано, что твердые смазки используются при черновом протягивании изделий из труднообрабатываемых материалов: хромоникельмолибденовых и нержавеющей сталей аустенитного класса, сплавов титана. Выполнен анализ необходимых условий для эффективного использования твердых смазок. Выбраны марки твердых смазок для обработки этих материалов. Разработана методика проведения исследования на натуральных образцах из стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0. Показаны особенности деформирования поверхностного слоя при использовании твердых смазок. Установлено отсутствие заметных деформаций сдвига в поверхностном слое обработанной заготовки. Высотный параметр Ra после каждого цикла деформации снижается незначительно, а микротвердость по толщине стенки практически не изменяется. Микрогеометрия обработанного поверхностного слоя мало отличается от исходной. Показано, что существующие модели для определения шероховатости обработанной поверхности не подходят к описанию процесса ее изменения при протягивании с использованием твердых смазок. Установлена функциональная связь между высотными параметрами шероховатости и относительным контактным давлением при обработке с использованием твердых смазок. Предложен теоретический расчет контактных давлений при раздате относительно тонкостенных заготовок с большими натягами. Определены области использования разработанной зависимости. Она должна использоваться только в том случае, когда контактные давления ниже критических. Результаты данной работы позволяют создать технологические расчетные схемы как для прогнозирования шероховатости обработанной поверхности, так и для обеспечения ее требуемого значения технологическими методами при черновом деформирующем протягивании изделий из труднообрабатываемых материалов с использованием различных смазок.

Ключевые слова: деформирующее протягивание, контактные явления, твердые смазки, труднообрабатываемые материалы, контактные давления, шероховатость, микротвердость обработанной поверхности.

Я. Б. НЕМИРОВСЬКИЙ, Е. К. ПОСВЯТЕНКО, І. Ю. РОСТОЦЬКИЙ, Ю. А. ЦЕХАНОВ

ОСОБЛИВОСТІ КОНТАКТНИХ ЯВИЩ ПРИ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТВЕРДИХ МАСТИЛ

У статті наведені результати вивчення контактних явищ при деформуючому протягуванні з використанням твердих мастил. Показано, що тверді мастила використовуються при чорновому протягуванні виробів з важкооброблюваних матеріалів: хромонікельмолибденових і нержавіючих сталей аустенітного класу, сплавів титану. Виконано аналіз необхідних умов для ефективного використання твердих мастил. Визначені марки твердих мастил для обробки цих матеріалів. Розроблено методику проведення дослідження на натурних зразках зі сталі 12Х18Н10Т і титанового сплаву ВТ1-0. Показано особливості деформування поверхневого шару при використанні твердих мастил. Встановлено відсутність помітних деформацій зсуву в поверхневому шарі обробленої заготовки. Висотний параметр Ra після кожного циклу деформації знижується несуттєво, а микротвердість по товщині стінки практично не змінюється. Геометрія обробленого поверхневого шару мало відрізняється від вихідної. Показано, що існуючі моделі для визначення шорсткості обробленої поверхні не підходять до опису процесу її зміни при протягуванні з використанням твердих мастил. Встановлено функціональний зв'язок між висотними параметрами шорсткості і відносним контактним тиском при обробці з використанням твердих мастил. Запропоновано теоретичний розрахунок контактної тиску при роздачі тонкостінних заготовок зі значними натягами. Визначені області використання розробленої залежності. Вона повинна використовуватися тільки в тому випадку, коли контактний тиск нижче критичного. Результати даної роботи дозволили створити технологічні розрахункові схеми як для прогнозування шорсткості обробленої поверхні, так і для забезпечення її необхідного значення технологічними методами при чорновому деформуючому протягуванні виробів з важкооброблюваних матеріалів при використанні різних мастил.

Ключові слова: деформуюче протягування, контактні явища, тверді мастила, важкооброблювані матеріали, контактний тиск, шорсткість, микротвердість обробленої поверхні.

YA. NEMYROVSKYI, E. POSVYATENKO, I. ROSTOTSKYI, YU. TSEKHANOV

FEATURES OF CONTACT EVENTS DURING DEFORMING BROACHING USING SOLID LUBRICANTS

The article presents the results of the study of contact events with deforming broaching using solid lubricants. It is shown that solid lubricants are used for rough broaching of products from difficult-to-work materials: chromium-nickel-molybdenum and stainless steels of austenitic class, titanium alloys. The analysis of the necessary conditions for the effective use of solid lubricants was carried out. Selected brands of solid lubricants for processing these materials. A technique has been developed for conducting research on full-scale samples of 12H18N10T steel and VT1-0 titanium alloy. The features of the deformation of the surface layer using solid lubricants are shown. The absence of noticeable shear deformations in the surface layer of the processed billet has been established. The height parameter Ra after each deformation cycle decreases slightly, and the microhardness along the wall thickness practically does not change. Microgeometry of the treated surface layer is slightly different from the original. It is shown that the existing models for determining the roughness of the treated surface do not fit the description of the process of its change during broaching using solid lubricants. A functional connection has been established between the height parameters of roughness and relative contact pressure when processed using solid lubricants. A theoretical calculation of contact pressures for the processing of relatively thin-walled workpieces with large tensions is proposed. Identified areas of use of the developed dependencies. It should only be used when contact pressures are below critical. The results of this work make it possible to create technical design schemes both for predicting the roughness of the treated surface and for ensuring its required value by technological methods for rough deforming broaching of products from difficult-to-work materials using various lubricants.

Keywords: deforming broaching, contact events, solid lubricants, difficult-to-work materials, contact pressure, roughness, the microhardness of the treated surface.

Введение. Деформирующее протягивание смазок, что исключает схватывание инструмента с изделий из пластичных металлов и сплавов всегда материалом заготовки, снижает энергозатраты на осуществляется с использованием технологических процесс, а также улучшает качество обработанной

© Я. Б. Немировский, Э. К. Посвятенко, И. Ю. Росточкий, Ю. А. Цеханов, 2019

поверхности.

Наиболее широкое применение имеют жидкие смазки, которые используются как при финишных, так и при черновых операциях. При финишной обработке они позволяют получить высокие эксплуатационные свойства обработанной поверхности заготовки. В этом случае между обрабатываемой поверхностью и деформирующим элементом существует непосредственный контакт в условиях жидкого смазывания. Обработанная поверхность получает упрочнение и текстурированный слой на глубину до 0,2 мм, сжимающие остаточные напряжения, которые превышают предел текучести обрабатываемого материала, низкую шероховатость ($Ra \leq 0,1 \mu\text{км}$), улучшенный микрорельеф, а также достигается высокая точность обработанного отверстия. Все это способствует повышению эксплуатационных характеристик готовой детали.

По данным работы [1] наиболее распространенными жидкими смазками являются смазки на масляной основе: сульфозрезол, минеральные масла класса МР, а также масла растительного происхождения. Для обработки цветных материалов применяется 10%-ный раствор мыла в воде.

Роль смазки при протягивании твердосплавными деформирующими элементами становится особенно значимой при деформировании деталей из труднообрабатываемых материалов: хромоникельмолибденовых и нержавеющей сталей аустенитного класса, сплавов титана. В этих случаях значительные деформации отверстия при протягивании с жидкими смазками становятся невозможными из-за адгезионного схватывания инструмента с деталью. Тогда используют твердые смазки, которые характеризуются высокими экранирующими свойствами [1].

Это дает возможность для таких материалов использовать деформирующее протягивание в качестве черновой операции формообразования, основной целью которой является повышение коэффициента использования материала на последующих операциях механической обработки. В этом случае главной характеристикой используемой смазки должны быть не антифрикционные, а экранирующие свойства, то есть способность исключения непосредственного контакта инструмента с изделием. Этому требованию соответствует ряд твердых смазок, которые обеспечивают также и адгезионные свойства. Они должны надежно закрепляться на обрабатываемой поверхности и локализовывать в себе большие сдвиговые деформации в самом слое смазки.

В ИСМ НАН Украины разработан ряд твердых смазок на основе эпоксидных смол и твердых наполнителей типа графита, дисульфида молибдена, нитрида бора [1] и др. Для улучшения экранирующих свойств их иногда модифицируют кремнийорганическими соединениями [2]. Это позволяет обрабатывать при деформациях до 10% отверстия в заготовках из следующих материалов:

нержавеющие и жаропрочные сплавы, закаленные стали 30ХГСА, ЭИ643, 30ХНМА, 38ХМЮА, термообработанные сплавы алюминия АК6, Д16, трубы из ванадия и ниобия, а также детали из титановых сплавов ВТ-0, ВТ-6, ВТ-22 [1,3].

Эффективность использования твердых смазок резко возрастает при больших контактных давлениях: $q \geq 1 \text{ ГПа}$, когда жидкие смазки не всегда обеспечивают отсутствие схватывания даже при обработке обычных конструкционных материалов. Твердые же смазки не только обеспечивают отсутствие схватывания, но имеют и более низкий коэффициент трения ($f = 0,02-0,04$), который в 2-3 раза ниже, чем коэффициент трения при использовании жидких смазок. Это позволяет значительно снизить энергозатраты процесса.

Цель работы. Исследование механики деформирующего протягивания в контактной зоне при обработке с использованием твердых смазок.

Это позволит выявить особенности протекания процесса и установить его влияние на показатели качества обработанной поверхности. В свою очередь исследования обеспечат расширение области применения деформирующего протягивания за счет создания новых технологических процессов обработки труднообрабатываемых материалов.

Методика исследований. Эксперименты проводились на втулках из стали 12Х18Н10Т с размерами: диаметр отверстия $d_0 = 35 \text{ мм}$, толщина стенки $t_0 = 35 \text{ мм}$, длина $l_0 = 250 \text{ мм}$. Исходная шероховатость поверхности отверстия после растачивания $Ra = 3-4 \text{ мкм}$.

И на втулках из титанового сплава ВТ1-0 с размерами: $d_0 = 35 \text{ мм}$, $t_0 = 4; 7; 9 \text{ мм}$, $l_0 = 250 \text{ мм}$ и $d_0 = 19 \text{ мм}$, $t_0 = 4; 7; 9 \text{ мм}$, $l_0 = 150 \text{ мм}$.

Протягивание осуществляли на горизонтально протяжном станке мод. 7Б520 и на специальном стенде, разработанном в ИСМ НАН Украины, позволяющим осуществлять прошивание заготовки с усилием до 100 кН.

При протягивании заготовок из стали 12Х18Н10Т использовали твердую смазку АСМ-6 [1], в состав которой входят лак Ф-9-К, дисульфид молибдена MoS_2 и толуол. Ранее [1] было установлено, что эта смазка выдерживает без разрушения контактные давления порядка 2,5 ГПа и весьма значительные деформации отверстия (до 15%).

При протягивании заготовок из титанового сплава ВТ1-0 использовали твердую смазку на основе диановой эпоксидной смолы с ангидридным отвердителем и наполнителем - коллоидным графитом, модифицированную введением кремнийорганических соединений и высокодисперсного углеродного наполнителя [2]. Указанная смазка выдерживает без разрушения контактные давления до 3,2 ГПа, что позволяет осуществлять весьма значительные деформации при раздате отверстия.

Шероховатость измеряли по параметру Ra вдоль образующей отверстия после каждого цикла деформации, то есть после каждого пропущенного деформирующего элемента, а также снимали

профилограммы поверхности до и после обработки. Измерение производили на профилометре-профилографе «Talysurf-5M-120» и на ВЭИ-Калибр мод. 201. После каждого цикла протягивания отрезали часть обработанной втулки длиной 10–15 мм, с которой твердая смазка удалялась ацетоном, и измеряли шероховатость.

В некоторых случаях исследование шероховатости и условий контактного взаимодействия производили с использованием поперечных шлифов на приборах «Микрон-гамма», конструкции Национального авиационного университета Украины.

Твердость образцов по Виккерсу измеряли на твердомере ХПО-250, а микротвердость – на приборе ПМТ-3 при нагрузках 50 и 200 грамм.

Результаты исследований. На рис. 1, приведены параметры качества поверхности, обработанной деформирующим протягиванием втулок из стали 12Х18Н10Т с применением твердой смазки на основе дисульфида молибдена.

Как видно, высотные параметры шероховатости снижаются с увеличением суммарной деформации раздачи, однако снижение происходит не так интенсивно как при применении жидких смазок [3], что, по-видимому, указывает на уменьшение сдвиговых деформаций в поверхностном слое. Профиль шероховатости обработанной поверхности втулки из стали 12Х18Н10Т предварительно расточенной и протянутой с использованием твердых смазок (рис. 2, а) также практически не изменяется. Также незначительно изменяется опорная поверхность на уровне средней линии (рис. 2, б).

После расточки исходная площадь опорной поверхности была 40%, а после 4 циклов деформирования она увеличилась всего на 6–7%. Это также подтверждается результатами измерения твердости обработанной поверхности (рис. 1, кривая 3), микротвердости поверхности и микротвердости материала на некоторой глубине от обработанной поверхности (рис. 1, кривая 2).

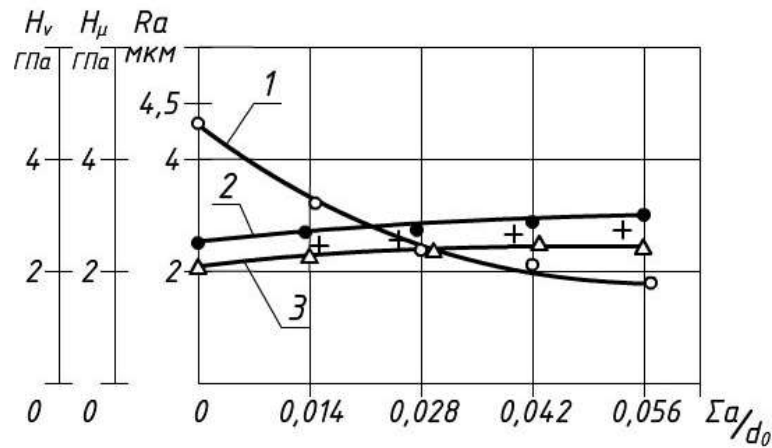


Рисунок 1 – Зависимость шероховатости (Ra), твердости HV , микротвердости $H_{\mu 50}$ от суммарной деформации при обработке втулок из стали 12Х18Н10Т: $t_0/d_0 = 0,22$ при использовании твердой смазки АСМ-6: 1 – Ra , 2 – $H_{\mu 50}$ (● – на поверхности, + – на глубине 0,5 мм), 3 – HV

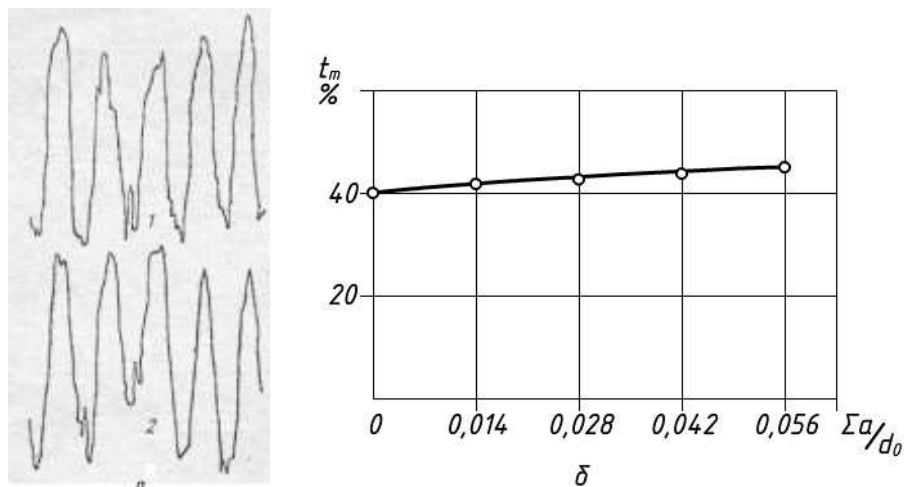


Рисунок 2 – Профиль исходной и обработанной поверхности (а) и опорная длина профиля на уровне средней линии (б): 1 – исходная поверхность после растачивания, 2 – поверхность после 4 циклов деформирования

Подобные результаты получены при деформировании заготовок из титанового сплава ВТ1-0 при применяемых деформациях отверстий до 6% (рис. 3). При обработке этих заготовок также использовалась твердая смазка на основе эпоксидной смолы с наполнителем коллоидным графитом, модифицированная кремнийорганическими соединениями и высокодисперсным углеродным наполнителем [2].

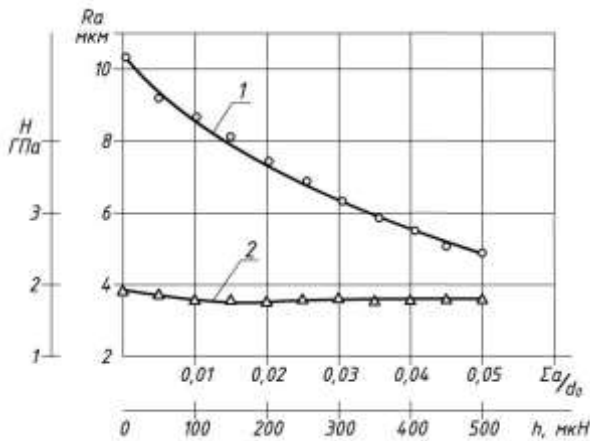


Рисунок 3 – Зависимость шероховатости (1) и микротвердости (2) от суммарной деформации при обработке втулок из титанового сплава ВТ1-0 с $t_0/d_0 = 0,21$ при использовании твердой смазки на основе диановой эпоксидной смолы ЭД-5 с коллоидным графитом в качестве наполнителя и модифицированной кремнийорганическими соединениями

В этом случае также отсутствуют заметные деформации сдвига в поверхностном слое, что подтверждается данными, приведенными на рис. 3. Из них следует, что высотный параметр Ra после каждого цикла снижается незначительно, что обусловлено влиянием в основном окружной деформации отверстия. Поэтому изменение микротвердости по толщине стенки почти незаметно. Это качественно отличается от известного характера изменения этого показателя при использовании жидких смазок, которые обуславливают образование текстуры и создание значительного градиента изменения упрочнения по толщине стенки [3].

Указанные особенности деформирования поверхностного слоя при использовании твердых смазок подтверждаются фотографиями шлифов контактной зоны, полученными на приборе «Микрон-гамма». Он позволяет получить не только реальную картину взаимодействия инструмента с обработанной поверхностью, но и определить при помощи масштабной линейки (1 деление – 10 мкм) высоту микронеровностей. Как видно (рис. 4), между контактирующими поверхностями присутствует слой твердой смазки, который за счет своих экранирующих свойств локализует в себе сдвиговые деформации. Микрогеометрия обработанного поверхностного слоя мало отличается от исходной. То есть, как указывалось выше, ее изменение вызвано, в основном, влиянием окружной деформации отверстия – $\sum a/d_0$.



Рисунок 4 – Контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью при использовании твердой смазки

Некоторые различия в значениях шероховатости (рис. 1 и 2) обусловлены ее разными исходными значениями. Для относительной шероховатости $\frac{Ra}{Ra_{исх}}$

экспериментальные точки для разных материалов ложатся практически на одну кривую (рис. 5), что свидетельствует, по-видимому, о близких экранирующих свойствах примененных твердых смазок.

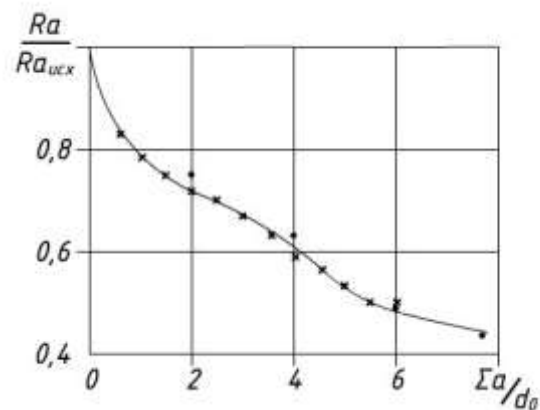


Рисунок 5 – Зависимость параметра $\frac{Ra}{Ra_{исх}}$ при обработке

втулок: × – из титана ВТ1-0: $t_0/d_0 = 0,21$,

$a_0/d_0 = 0,005$; • – из нержавеющей стали 12Х18Н10Т:

$t_0/d_0 = 0,22$, $a_0/d_0 = 0,014$

При деформировании этих втулок определялись нормальные контактные давления. Их изменение в зависимости от деформации показано на рис. 6.

Анализ полученных результатов показал, что существующие модели для определения шероховатости обработанной поверхности после деформирующего протягивания, приведенные в работе [4], не подходят к описанию процесса изменения шероховатости при протягивании с использованием твердых смазок.

Одна из этих моделей, применяемая при малоцикловом деформировании, построена на основе схемы осадки конуса или призмы. При этом аналитически была установлена связь высотных параметров шероховатого слоя с суммарным контактным давлением $\sum q$, накопленным на каждом цикле деформации [4].

Другая модель этой работы получена для расчета изменения высотных параметров шероховатости при многоцикловом деформировании и учитывает влияние не только нормальных нагрузок, но и касательных,

обусловленных силами трения между контактирующими поверхностями. В этом случае процесс уменьшения высотных параметров шероховатости происходит не только от сдавливания под действием нормальной нагрузки, но и от массопереноса, обусловленного «заваливанием» микронеровностей под действием силы трения, возникающей при использовании жидких смазок (рис. 7). Причем, с увеличением числа циклов деформации влияние силы трения на микрорельеф возрастает. Одновременно с уменьшением высоты микронеровностей происходит заполнение впадин за счет массопереноса материала микровыступов от действия трения.

При протягивании с использованием твердых смазок происходит несколько иное явление. В этом случае процесс раздачи происходит при отсутствии сил трения на поверхности заготовки, которые локализуются в слое твердой смазки (рис. 4). Поэтому при использовании больших натягов на деформирующий элемент и малых углов рабочего конуса инструмента, когда контактные давления невысокие и не превышают значение критического контактного давления для данного материала заготовки [3], схема раздачи будет близка к раздаче трубы внутренним давлением.

Для технологических расчетов, связанных с прогнозированием и с обеспечением требуемой шероховатости, необходимо установить связь высотных параметров шероховатости с контактным давлением q .

Как известно [3], величина q пропорциональна твердости обрабатываемого материала. Проанализируем зависимость относительной шероховатости $\frac{Ra}{Ra_{исх}}$ от безразмерного контактного давления $\frac{q}{HV}$ (рис. 8). Видно, что эта зависимость практически линейная и не зависит от

обрабатываемого материала:

$$\frac{Ra}{Ra_{исх}} = 1 - 0,36 \frac{q}{HV}. \quad (1)$$

В работах [1,3] на основе анализа значительного количества экспериментальных данных, предложены эмпирические расчетные зависимости для определения q в зависимости от технологических факторов и свойств обрабатываемых материалов.

Для этого экспериментально определяется осевая сила протягивания и длина контакта l . По формуле (2) рассчитывается среднее значение контактного давления:

$$q = \frac{Q \cos \eta}{\pi d_0 l \sin(\alpha + \eta)}, \quad (2)$$

где η – угол трения, $\eta = \arctg f$, f – коэффициент трения, α – угол наклона образующей рабочего конуса деформирующего элемента.

Коэффициент трения для твердых смазок определялся экспериментально и аппроксимировался зависимостью:

$$f = C_{fm} q^{-xm}. \quad (3)$$

Значение коэффициентов C_{fm} и xm для наших условий обработки приведены в таблице 1.

В работе [6] предложена расчетная схема определения q при обработке с малыми натягами существенно толстостенных заготовок с «бесконечной толщиной стенки» [3], когда $t_0 \geq d_0$. Однако она корректна для расчета контактного давления, когда его величина превышает значение критического давления [3].

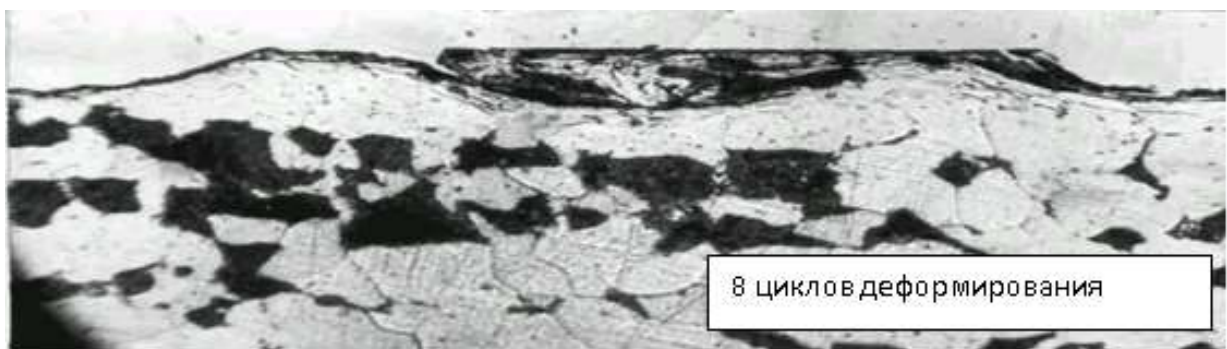


Рисунок 7 – Характер деформирования микровыступа заготовки из стали 45 при числе циклов деформирования равных 8; $\times 500$

Таблица 1 – Значение коэффициентов C_{fm} и xm для различных смазок

Смазка	C_{fm}	xm
нержавеющая сталь 12X18H10T	0,087	1,05
титановый сплав BT1-0	0,048	0,98

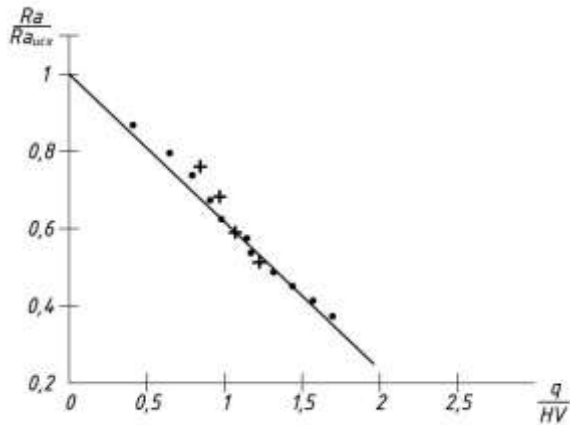


Рисунок 8 – Зависимость относительного высотного параметра шероховатости от относительного контактного давления при обработке заготовок из титана ВТ1-0 (●): $t_0/d_0 = 0,21$, $a_0/d_0 = 0,0028$; из нержавеющей стали 12X18H10T (×): $t_0/d_0 = 0,22$, $a_0/d_0 = 0,014$

Таким образом, для технологических расчетов параметров шероховатости нам необходимо знать контактное давление, твердость обрабатываемого материала и исходную шероховатость поверхности отверстия.

На основе полученных в данной работе результатов, можно предложить теоретический метод расчета контактных давлений при раздаче относительно тонкостенных заготовок с большими натягами, когда контактные давления ниже критических. Отметим актуальность этого вопроса. Большие степени раздачи применяются для черновых формообразующих операций, а для такой обработки заготовок из вышеописанных труднообрабатываемых материалов используются именно твердые технологические смазки.

Поскольку, как показано выше, величина шероховатости обработанной поверхности зависит только от суммарной степени деформации отверстия, то естественно предположить, что в случае применения твердых смазок, процесс деформирования будет близким к схеме раздачи трубы внутренним давлением. Как показано в работах [4,5], такая расчетная схема приемлема для деформирующего протягивания при определении деформации разрушения заготовок и их геометрических параметров после протягивания.

Поэтому используем эту модель для определения контактных давлений для нашего случая. Расчетная схема представлена на рис. 9.

Пусть упрочнение материала заготовки аппроксимируется зависимостью:

$$\sigma_0 = \sigma_T + Ae_0^n, \quad (4)$$

где σ_0 и e_0 – интенсивность напряжений и интенсивность пластических деформаций; σ_T – предел текучести; A и n – эмпирические коэффициенты.

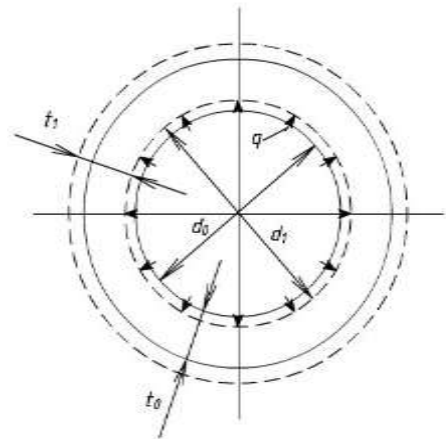


Рисунок 9 – Расчетная схема раздачи

Для относительно тонкостенных заготовок, средняя окружная деформация:

$$e_\varphi = \frac{\sum a}{d_0} = \sum \bar{a}. \quad (5)$$

При отсутствии осевого стеснения

$$e_0 = e_\varphi = \sum \bar{a}. \quad (6)$$

Тогда $\sigma_0 = \sigma_T + A(\sum \bar{a})^n$. (7)

Удельная работа пластических деформаций (в единице объема)

$$A^* = \sigma_0 e_0 = \sigma_T e_0 + Ae_0^{n+1}. \quad (8)$$

Полная работа пластических деформаций

$$A = A^* \cdot V_0, \quad (9)$$

где V_0 – исходный объем заготовки, которой при деформировании не меняется:

$$V_0 = \pi d_0 t_0 L_0, \quad (10)$$

L_0 – длина заготовки.

С учетом (10):

$$A = \pi d_0 t_0 L_0 \left[\sigma_T \sum \bar{a} + A(\sum \bar{a})^{n+1} \right]. \quad (11)$$

Элементарная работа на приращении диаметра $d(\sum \bar{a})$:

$$dA = \pi d_0 t_0 L_0 \left[\sigma_T d \sum \bar{a} + A(n+1)(\sum \bar{a})^n d(\sum \bar{a}) \right]. \quad (12)$$

С другой стороны она производится текущим контактным давлением q на приращении $d(\sum \bar{a})$:

$$dA = q\pi d_0 t_0 L_0 d(\sum \bar{a}). \quad (13)$$

Приравняв выражения (12) и (13) получим:

$$q = \frac{t_0}{d_0 + \sum \bar{a}} \left[\sigma_T + A(n+1)(\sum \bar{a})^n \right]. \quad (14)$$

Здесь учтено, что текущее значение диаметра отверстия $d_1 = d_0 + \sum \bar{a}$.

Для расчета контактных давлений по зависимости (14) необходимо знать размеры заготовки и кривую упрочнения ее материала. Определим область использования формулы (14) сравнением расчетных и экспериментальных (по [3]) значений q (рис.10) для случая обработки заготовок из стали 20 и стали 45.

Для стали 20 кривая течения аппроксимировалась зависимостью $\sigma = 220 + 624e^{0.473}$ (Мпа), а для стали 45 – $\sigma = 350 + 1180e^{0.5}$ (Мпа). Как видно, хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных (рис.10.а, кривые 2 и 3 и 10.б, кривая 2) наблюдается при значениях контактных давлений ниже критических, которые, согласно данных [3], приводят к появлению в очаге деформации локальной зоны пластического деформирования в виде наплыва. Она вызывает появление осевого течения обрабатываемого материала и больших сдвиговых деформаций (текстуры). При наличии критических контактных давлений расчетные контактные давления значительно ниже экспериментальных (рис. 10, а, кривые 1 и 2 и рис.10, б, кривые 1 и 2).

Это обусловлено несоответствием условий деформирования заготовки к схеме раздачи трубы внутренним давлением. Из этого можно сделать следующий вывод: теоретический расчет контактного давления по зависимости (14) можно осуществлять при контактных давлениях меньше критических. Авторами [3] установлено, что для стали 45 критические контактные давления равны 0,87 ГПа, а для стали 20 – 0,78 ГПа. При контактных давлениях равных и выше критических их расчет необходимо осуществлять по зависимости (2) либо по методике, приведенной в работе [6]. Значение q зависит от режимов протягивания и размеров заготовки

Толщина стенки, при которой появляются критические контактные давления, зависит от натяга на элемент, угла α , а также схемы протягивания и определяется, по экспериментально полученным зависимостям (15) и (16) для схем растяжения и сжатия соответственно [7]:

$$t_0/d_0 = 3,39 \left(a/d_0 \right)^{0.75} \cdot \alpha^{-\left(0,17+14,3a/d_0\right)}. \quad (15)$$

$$t_0/d_0 = \left(0,11 + 10,24 a/d_0 \right) \cdot \alpha^{-\left(0,17+11,6a/d_0\right)}. \quad (16)$$

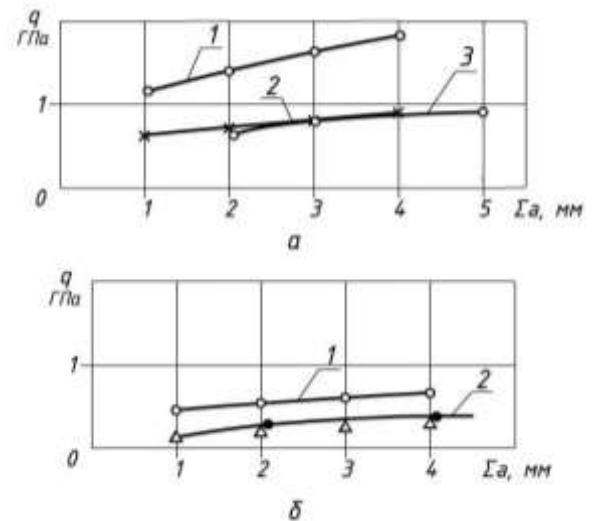


Рисунок 10 – Зависимость контактных давлений от суммарной деформации при обработке заготовок: а) из стали 45: $t_0/d_0 = 0,136$, $a_0/d_0 = 0,015$: 1 – эксперимент, 2 – расчет по (14), 3 – $a_0/d_0 = 0,03$ (эксперимент и расчет по (14)); б) из стали 20: $t_0/d_0 = 0,65$, $a_0/d_0 = 0,015$: 1 – эксперимент, 2 – расчет по (14) (Δ); $a_0/d_0 = 0,03$ (\bullet) – расчет по (14) и эксперимент.

Они и позволяет определить условия использования формулы (14).

Таким образом, результаты данной работы позволяют создать технологические расчетные схемы, как для прогнозирования шероховатости обработанной поверхности, так и для обеспечения ее требуемого значения технологическими методами при черновом деформирующем протягивании изделий из труднообрабатываемых материалов.

Выводы. Полученные результаты позволяют:

- выполнить анализ необходимых условий для эффективного использования твердых смазок;
- вскрыть особенности деформирования при использовании твердых смазок;
- установить функциональную связь между высотными параметрами шероховатости и относительным контактным давлением при обработке с использованием твердых смазок;

получить теоретическую зависимость для расчета контактных давлений и установить, что область ее эффективного применения ограничена условием, согласно которому эти давления не должны превышать своего критического значения.

Список литературы

1. Розенберг А. М., Розенберг О. А., Посвятенко Э. К., Бусел Ю. Ф., Гриценко Э. И., Крицкий А. Д. *Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания* / АН УССР. ИСМ. Киев: Наук. думка, 1978. 256 с.

2. Розенберг О. А., Пашченко Е. А., Шейкин С. Е., Ростотский И. Ю. О выборе технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из титановых сплавов. *Технологические системы*. 2007. № 2 (38). С. 27–32.
 3. Розенберг А. М., Розенберг О. А. *Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания* / отв. ред. Родин П. Р. Киев: Наук. думка, 1990. 320 с.
 4. Балаганская Е. А., Голоденко Б. А., Немировский Я. Б., Цеханов Ю. А. *Математическое моделирование процесса деформирующего протягивания* / М-во образования Рос. Федерации. Воронежская гос. технол. акад. Воронеж: Воронежская гос. технол. акад., 2001. 194 с.
 5. Цеханов Ю. А., Шейкин С. Е. *Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании* / М-во образования Рос. Федерации. Воронеж. гос. технол. акад. Воронеж: Воронежская гос. технол. акад., 2001. 200 с.
 6. Цеханов Ю. А., Розенберг О. А., Дель Г. Д. Напряженное состояние при деформирующем протягивании толстостенной трубы. *Известия вузов: Машиностроение*. 1976 г. № 5. С. 153–156.
- Немировский Я. Б., Цеханов Ю. А., Балаганская Е. А. Исследование изменения размеров полых осесимметричных заготовок при раздате их деформирующим протягиванием. *Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением*. 2005. № 2. С. 12–15.
- References (transliterated)**
1. Rosenberg A. M., Rozenberg O. A., Posvyatyenko E. K., Busel Y. F., Gritsenko E. I., Kritsky A. D. *Raschet i proektirovanie tverdosplynykh deformiruyuschih protyazhek i processa protyagivaniya* [Calculation and design of hard-alloy deforming broaches and the process of broaching] / AN USSR. IMS. Kiev, Naukova dumka, 1978. 256 p.
 2. Rosenberg O. A., Pashchenko E. A., Sheikin S. E., Rostotsky I. Yu. O vybere tehnologicheskikh smazok dlya deformiruyushego protyagivaniya detaley iz titanovih splavov [On the choice of technological lubricants for deforming broaching of parts made of titanium alloys]. *Technological systems*. 2007, no. 2 (38), pp. 27–32.
 3. Rosenberg A. M., Rosenberg O. A. *Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya v processah rezaniya i deformiruyushego protyagivaniya* [Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and deforming broaching] / rep. ed. Rodin P. R. Kiev? Naukova dumka, 1990. 320 p.
 4. Balaganskaya E. A., Golodenko B. A., Nemyrovskiy Ya. B., Tsekhanov Yu. A. *Matematicheskoe modelirovanie processa deformiruyushego protyagivaniya* [Mathematical modeling of the process of deforming broaching] / Ministry of Education Rus. Federation. Voronezh State. technol. Acad. Voronezh, Voronezh State. technol. Acad., 2001. 194 p.
 5. Tsekhanov Yu. A., Sheikin S. Ye. *Mekhanika formoobrazovaniya zagotovok pri deformiruyuschem protyagivanii* [Mechanics of shaping blanks during deforming broaching] / Ministry of Education Rus. Federation. Voronezh. state technol. Acad. Voronezh, Voronezh State. technol. Acad., 2001. 200 p.
 6. Tsekhanov Yu. A., Rosenberg O. A., Del G. D. Napryazhennoe sostoyanie pri deformiruyuschem protyagivanii tolstostennoi truby [Stress state during deforming broaching of a thick-walled pipe]. *News of universities: Engineering*. 1976, no. 5, pp. 153–156.
- Nemyrovskiy Ya. B., Tsekhanov Yu. A., Balaganskaya Ye. A. Issledovanie izmeneniya razmerov polyh osesimetrichnih zagotovok pri razdache ih deformiruyuschym protyagivaniem [Investigation of changes in the dimensions of hollow axisymmetric blanks when processing by deforming broaching]. *Forging and stamping production. Processing of materials by pressure*. 2005, no. 2, pp. 12–15.

Надійшла (received) 25.04.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Немировський Яков Борисович (Немировский Яков Борисович, Yakov Nemyrovskiy) – доктор технічних наук, професор кафедри Центральноукраїнського технічного університету; м. Кропивницький, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8005-8584>; e-mail: provotorova1951@gmail.com

Посвятенко Едуард Карпович (Посвятенко Эдуард Карпович, Eduard Posvyatenko) – доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6606-1365>; e-mail: natali1963@ukr.net.

Ростоцький Ігор Юрійович (Ростоцкий Игорь Юрьевич, Igor Rostotskiy) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів НАН України; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>; e-mail: @gmail.com

Цеханов Юрій Олександрович (Цеханов Юрий Александрович, Yuriy Tsekhanov) – доктор технічних наук, професор, Вороніжський державний технічний університет; м. Вороніж, Росія; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1315-8491>; e-mail: tsekhanov@yandex.ru.

С.О. ГУБСЬКИЙ, В.Л. ЧУХЛІБ, М.В. БІБА, А.О. ОКУНЬ, Є.В. БАСОВА

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОКАТКИ В РІЗНИХ САЕ-СИСТЕМАХ

В статті пропонується порівняльні результати моделювання поздовжньої прокатки в САЕ-системах ANSYS Workbench (модуль Static Structural) та QForm. Відомо, що ANSYS Workbench є САЕ-системою орієнтованою на вирішення широкого спектру завдань в механіці, QForm – вузькоспеціалізованою (орієнтована на обробку металів тиском). На відміну від статичних завдань в механіці, при прокатці метал піддається пластичним деформаціям, це призводить до виникнення нелінійних ефектів і, як наслідок, постійної зміни жорсткості досліджуваної моделі при зміні її форми. При моделюванні прокатки в ANSYS Workbench використовувався модуль Static Structural (матеріал з властивостями для нелінійних завдань та опцією врахування великих переміщень), в QForm спеціалізований модуль під прокатку - QForm Rolling.

Ключові слова: прокатка, валки, заготовка, деформація, метал, моделювання, аналіз, напруження, нагрів, навантаження, метод кінцевих елементів.

С.А. ГУБСКИЙ, В.Л. ЧУХЛЕБ, Н.В. БИБА, А.А. ОКУНЬ, Е.В. БАСОВА

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОКАТКИ В РАЗНЫХ САЕ-СИСТЕМАХ

В статье предлагаются сравнительные результаты моделирования продольной прокатки в САЕ-системах ANSYS Workbench (модуль Static Structural) и QForm. Известно, что ANSYS Workbench является САЕ-системой ориентированной на решение широкого спектра задач в механике, QForm - узкоспециализированной (ориентированной на обработку металлов давлением). В отличие от статических задач в механике металл при прокатке подвергается пластическим деформациям, это приводит к возникновению нелинейных эффектов и, как следствие, постоянного изменения жесткости исследуемой модели при изменении ее формы. При моделировании прокатки в ANSYS Workbench использовался модуль Static Structural (материал со свойствами для нелинейных задач и опцией учета больших перемещений), в QForm специализированный модуль под прокатку - QForm Rolling.

Ключевые слова: прокатка, валки, заготовка, деформация, металл, моделирование, анализ, напряжение, нагрев, нагрузки, метод конечных элементов.

S. GUBSKYI, V. CHUHLIB, M. BIBA, A. OKUN, Ye. BASOVA

COMPARISON OF THE RELEASE OF ROLLING SIMULATION IN DIFFERENT CAE SYSTEMS

The article presents comparative results of longitudinal rolling simulation in ANSYS Workbench (Static Structural module) and QForm CAE systems. It is known that ANSYS Workbench is a CAE system focused on solving a wide range of problems in mechanics, and QForm is a highly specialized pressure-oriented metal processing program. Unlike static tasks in mechanics metal, when the rolling, is subjected to plastic deformations, this leads to the emergence of nonlinear effects and, as a consequence, a constant change in the stiffness of the model under consideration when changing its shape. The Static Structural module of ANSYS Workbench (material with properties for nonlinear tasks and the option to account for large displacements) and QForm Rolling of QForm (specialized module for the rolling) were used for simulation of the rolling.

Keywords: rolling, rolls, billet, deformation, metal, modeling, analysis, stress, heating, loading, finite element method.

Вступ. Розробка технології та виготовлення деталей обробкою металів тиском (ОМТ) була і є сьогодні складним завданням. Адже необхідно отримати кінцеву деталь без дефектів, але й при цьому оптимізувати витрати металу, зменшити енерговитрати, підвищити стійкість інструменту та інше. Різноманітні системи автоматизованого проектування (CAD/CAE системи) дозволяють значно підвищити ефективність проектування технологічних процесів виробництва ОМТ [1].

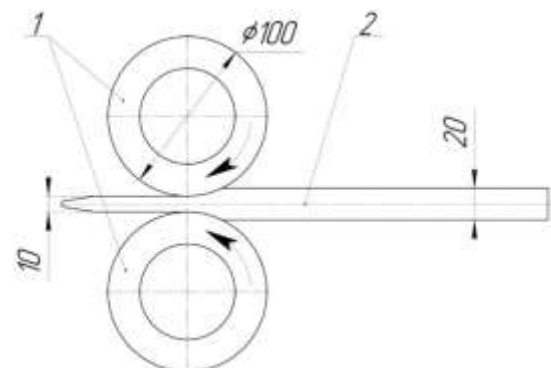
Як відомо, САЕ-системи діляться на вузькоспеціалізовані (наприклад, QForm, Deform, AutoForm та інші) та орієнтовані на вирішення широкого спектру завдань (наприклад, Ansys, Nastran, Abaqus та інших) [2-6].

Особливості та порівняння результатів моделювання процесів ОМТ в САЕ-системах, наприклад, QForm та Deform розглянуто в багатьох наукових роботах, наприклад [7-12].

Мета дослідження. При виготовленні деталей шляхом ОМТ метал піддається пластичним деформаціям. Програмне забезпечення платформи ANSYS Workbench (модуль Static Structural) є універсальним, але використовується для моделювання

процесів переважно в пружній або пружньо-пластичній зоні деформації металів. Програмні комплекси QForm та Deform працюють з металом в пластичній зоні деформації. В даній роботі буде зроблене порівняння моделювання прокатки заготовки в ANSYS Workbench (модуль Static Structural) та QForm.

Моделювання. Розглянемо процес моделювання поздовжньої прокатки, схема якого зображена на рис. 1



Рисеујр 1 - Схема поздовжньої прокатки:
1 – валки; 2 – заготовка

Заготовка 1 (рис. 1) має прямокутний переріз 20x40 та виготовлена з латуні марки Л90, температура валків 1 та заготовки 2 складає 20 °С.

При моделюванні прокатки в ANSYS Workbench вказуємо матеріал: валків – конструкційна сталь, заготовки – латунь. Так як в заготовці при прокатці будуть відбуватися значні пластичні деформації, то її матеріал задаємо з властивостями для нелінійних завдань.

Весь процес моделювання поздовжньої прокатки в ANSYS Workbench виконується в модулі Static Structural.

Параметри жорсткості матеріалу валків та заготовки задаємо, як Flexible (пружні).

Тип контакту поверхні валків з поверхнею заготовки –Frictional, коефіцієнт тертя 0,2 (рис. 2 а). Також в валках задаємо контакт виду «шарнір» (Joint) з типом зв'язку «обертання» (Revolute) між гранню та «землею» (Body-Ground) – рис. 2 б

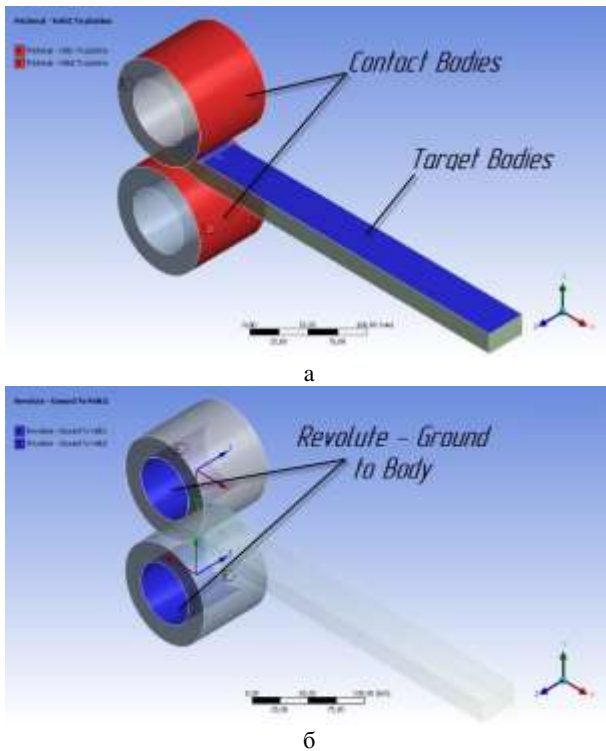


Рисунок 2 - Схема контактів моделі поздовжньої прокатки в ANSYS Workbench: а, б – тими систем зв'язків

Щоб врахувати великі переміщення в заготовці активуємо пункт «Великі переміщення» (LargeDeflection - on) в вітці AnalysisSettings. Це дасть можливість враховувати нелінійні ефекти та змінювати жорсткість конструкції при зміні форми заготовки програмі автоматично.

Для формування сітки кінцевих елементів заготовки обираємо метод Sweep, розмір елементів 5 мм. Сітку для валків будуємо шляхом завдання кількості ліній розбивання – 15 (параметр Number of Divisions). В результаті отримуємо сітку кінцевих елементів моделі поздовжньої прокатки в ANSYS

Workbench – рис. 3 а, з прийнятними характеристиками сітки – рис. 3 б.

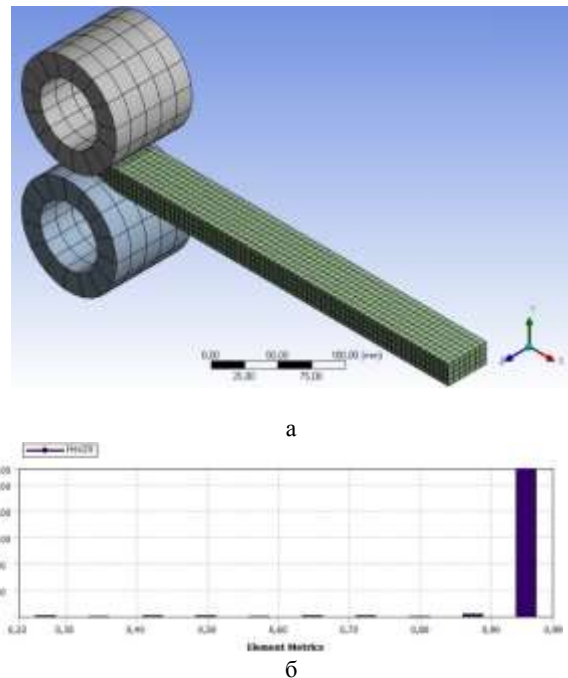


Рисунок 3 - Схема розбиття на сітку кінцевих елементів в ANSYS Workbench: а – моделі поздовжньої прокатки; б – характеристики сітки

Задаємо закріплення заготовки (Displacement) дозволяючи тільки переміщення по осі X. Зусилля в шарнірах (Joint Load) обираємо типу «Обертання» (Rotation) на кут для кожного валка в 180° чи -180° в залежності від необхідного напрямку обертання – рис. 4

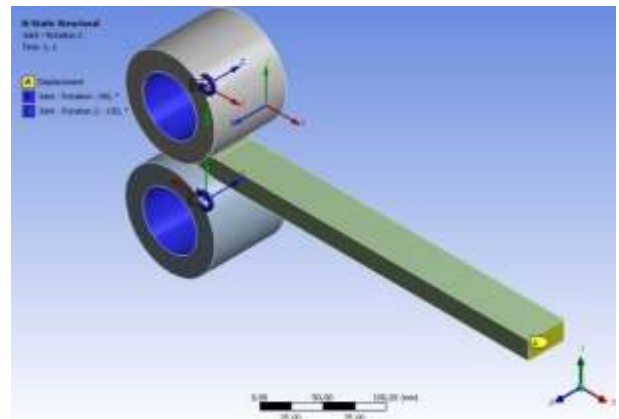


Рисунок 4 - Схема закріплення та навантаження моделі поздовжньої прокатки в ANSYS Workbench

Для моделювання досліджуваної схеми прокатки в QForm активуємо модуль QForm Rolling, завантажуюмо геометрію та позиціонуємо елементи, задаємо вісі, матеріал та температуру заготовки і валків. Зазначаємо, що змащування відсутнє (Unlubricated). Тип приводу створюємо «Універсальний» задаючи для кожного валка кут, напрям та швидкість обертання навколо своєї вісі.

Результати моделювання. В результаті моделювання поздовжньої прокатки в ANSYS Workbench отримуємо (розглядалася тільки заготовка):

- деформації заготовки по осі Z відносно середини, що складають максимально 2,68 мм по краях моделі (рис. 5)

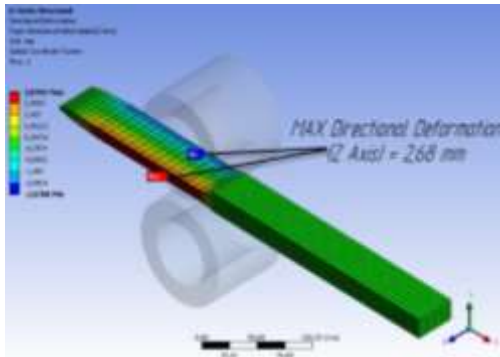


Рисунок 5 - Деформації заготовки по осі Z відносно середини при моделюванні прокатки в ANSYS Workbench

- максимальні еквівалентні напруження 1154-1192 МПа в місці деформації заготовки валками (рис. 6 а та б)

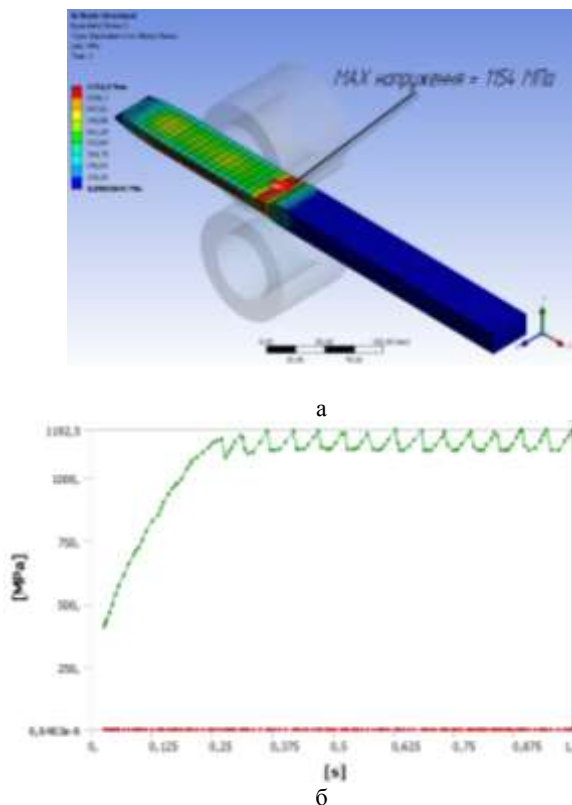


Рисунок 6 - Еквівалентні напруження в заготовці, що виникають при моделюванні поздовжньої прокатки в ANSYS Workbench: а – розподілення напружень в заготовці, б – графік зміни максимальних та мінімальних напружень в заготовці за час 1 с

- еквівалентні пластичні відносні деформації заготовки складають максимально 0,73 (рис. 7)

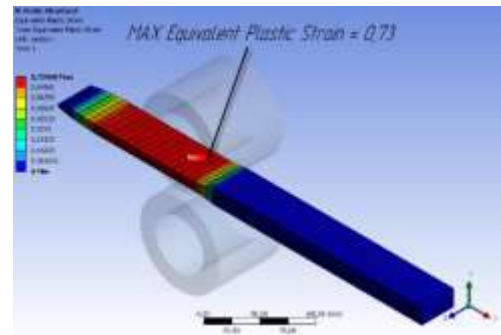


Рисунок 7 - Еквівалентні пластичні відносні деформації заготовки при моделюванні поздовжньої прокатки в ANSYS Workbench

В результаті моделювання прокатки в QForm отримуємо (розглядалася тільки заготовка):

- нагрів заготовки до температури 56 °С;
- розподілення інтенсивності напружень в заготовці – рис. 8

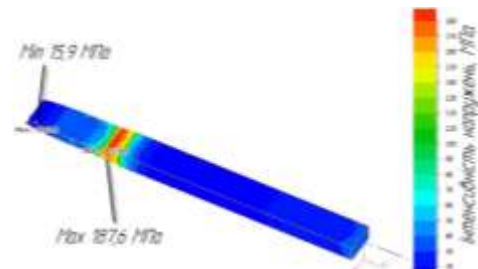


Рисунок 8 - Розподілення інтенсивності напружень в заготовці при моделюванні поздовжньої прокатки в QForm

- пластичні деформації в заготовці – рис. 9

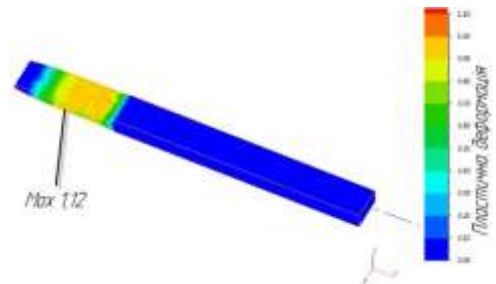


Рисунок 9 - Пластичні деформації в заготовці при моделюванні поздовжньої прокатки в QForm

Порівнюючи результати моделювання поздовжньої прокатки при однакових умовах в ANSYS Workbench (модуль Static Structural) та QForm отримуємо:

- значно вищі напруження (в 5 разів) при моделюванні моделі ANSYS Workbench (див. рис. 6 та 8);
- вищі пластичні деформації на 35 % при моделюванні моделі в QForm (див. рис. 7 та 9).

Висновки. ANSYS Workbench (модуль Static Structural) використовується для моделювання процесів переважно в пружно-пластичній зоні деформацій. Використання даного модуля в пластичній зоні деформації, як показало моделювання наведене в

даній роботі, призведе до значних погрешностей в результатах. Моделювання прокатки в QForm дало очікувані результати, наближені до реальних.

Напевне, сходиність результатів моделювання прокатки в ANSYS Workbench модулях Transient Structural або Explicit Dynamics з QForm буде краща, але це потребує подальших досліджень.

Список литературы

1. Горбунов И.В., Ефременков И.В., Леонтьев В.Л., Гисметулин А.Р. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ-системах. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Самара, 2013. т.15, №4(4), С. 846-852.
2. Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, моделирование металлургических процессов*. Магнитогорск, 2012. №4, С. 72-74.
3. Поляков С.А., Аксенов С.А., Бобер И.В. и др. Математическое моделирование в нелинейной механике. *ИКИ РАН ГОУ ВПО «Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)»*. Москва, 2009. 42 с.
4. Руденко Н. А. Моделирование процесса прессования порошковых изделий. *Обработка материалов давлением*. 2016. № 2. С. 46-50.
5. Губський С. О., Цебренько М.В., Окунь А.О. Дослідження напруженого деформованого стану металоконструкції стелю механізму підйому вантажу. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер. : Технології в машинобудуванні*. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. № 6 (1282). С. 50-54.
6. QForm 2D/3D Програма для моделювання процесів обробки металів тиском. *ООО «КванторФорм»*. Москва, 2017. ч. 1-4.
7. http://studvesna.ru/db_files/articles/179/article.pdf.
8. Горохов Ю.В., Константинов И.Л. Компьютерное моделирование процессов горячей объемной штамповки алюминиевых сплавов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Тула, 2017. Вып.11, ч.1, С. 101-109.
9. <http://www.artech-eng.ru/images/stories/Stat/DEFORM/Ore11.pdf>.
10. Bandini C., Reggiani B., Donati L., Tomesani L. Code Validation and Development of User Routines for Microstructural Prediction with Qform. *Materialstoday: Proceedings*. Volume 2. Issue 10. Part A. 2015. P. 4904-4914.
11. Łukaszek-Solek A., Krawczyk J., Śleboda T., Grelowski J. Optimization of the hot forging parameters for 4340 steel by processing maps. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 8. Issue 3. May–June 2019. P. 3281-3290.

12. Alimov A., Evdokimov D., Evsyukov S. Temperature and strain rate dependent friction model for hot forming of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Materialstoday: Proceedings*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.059>.

References (transliterated)

1. Gorbunov I.V., Yefremenkov I.V., Leont'yev V.L., Gismetulin A.R. Osobennosti modelirovaniya protsessov mekhanicheskoy obrabotki v CAE-sistemakh. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. Samara, 2013. t.15, №4(4), pp. 846-852.
2. Baryshnikov M.P., Chuikin M.V., Boyko A.B. Analiz programmnykh kompleksov dlya rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kompozitsionnykh materialov v protsessakh obrabotki davleniyem. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova, modelirovaniye metallurgicheskikh protsessov*. Magnitogorsk, 2012. №4, pp. 72-74.
3. Polyakov S.A., Aksenov S. A., Bober I. V. i dr. Matematicheskoye modelirovaniye v nelineynoy mekhanike. *IKI RAN GOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki (tekhnicheskiy universitet)»*. Moskva, 2009. 42 p.
4. Rudenko N. A. Modelirovaniye protsessa pressovaniya poroshkovykh izdeliy. *Obrabotka materialov davleniyem*. 2016. № 2. pp. 46-50.
5. Gubskiy S. O., Tsebrenko M.V., Okun A.O. Doslidzhennya napruzhenoho deformovanoho stanu metalokonstruktsiyi stendy mekhanizmu pidyomu vantazhu. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KHPI" : zb. nauk. pr. Ser. : Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*. Kharkiv : NTU "KHPI", 2018. № 6 (1282). pp. 50-54.
6. QForm 2D/3D Programma dlya modelirovaniya protsessov obrabotki metallov davlenim. *ООО «KvantorForm»*. Moskva, 2017. ch. 1-4.
7. http://studvesna.ru/db_files/articles/179/article.pdf.
8. Gorokhov Y.V., Konstantinov I.L. Komp'yuternoye modelirovaniye protsessov goryachey ob'yemnoy shtampovki alyuminiyevykh splavov. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki*. Tula, 2017. Vyp.11, ch.1, pp. 101-109.
9. <http://www.artech-eng.ru/images/stories/Stat/DEFORM/Ore11.pdf>.
10. Bandini C., Reggiani B., Donati L., Tomesani L. Code Validation and Development of User Routines for Microstructural Prediction with Qform. *Materialstoday: Proceedings*. Volume 2. Issue 10. Part A. 2015. P. 4904-4914.
11. Łukaszek-Solek A., Krawczyk J., Śleboda T., Grelowski J. Optimization of the hot forging parameters for 4340 steel by processing maps. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 8. Issue 3. May–June 2019. P. 3281-3290.
12. Alimov A., Evdokimov D., Evsyukov S. Temperature and strain rate dependent friction model for hot forming of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Materialstoday: Proceedings*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.059>.

Поступила (received) 23.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Губський Сергій Олександрович (Губский Сергей Александрович, Sergii Gubskiy) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Обробка металів тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; тел.: (066) 219-20-50; e-mail: Gubskiyso@gmail.com.

Чухліб Віталій Леонідович (Чухлеб Виталий Леонидович, Chukhlib Vitalij Leonidovich) – доктор технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Обробка металів тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: profdnepro@gmail.com.

Біба Микола Вікторович (Биба Николай Викторович, Mykola Viba) – кандидат технічних наук, директор MICAS Simulations Ltd; м. Оксфорд, Велика Британія; e-mail: nick@qform.com.

Окунь Антон Олександрович (Окунь Антон Александрович, Anton Okun) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Обробка металів тиском»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6467-4229>; тел.: (067) 578-63-17; e-mail: okunanton@gmail.com.

Басова Євгенія Володимирівна (Басова Евгения Владимировна, Yevheniia Basova) – кандидат технічних наук, доц. кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4788>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

*О.П. СТАРЧЕНКО***ТЕХНОЛОГИЯ ОБРОБКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ШЛИЦОВЫХ З'ЄДНАНЬ З МОДИФІКОВАНИМ ПРОФІЛЕМ ІНСТРУМЕНТА**

Вирішенням питання підвищення точності, якості та продуктивності виготовлення евольвентних шлицьових з'єднань натомість прямобічним шлицьовим з'єднанням є удосконалення технологічного обладнання та впровадження надшвидкісної обробки деталей за одну установку на високоефективному технологічному обладнанні. Технологічні методи обробки крупногабаритних елементів евольвентних шлицьових з'єднань шляхом впровадження прогресивних схем зубообробки та удосконаленого інструменту забезпечують підвищення продуктивності, точності та якості за рахунок з'єднань з модифікацією зуборізного інструменту червячної фрези для валів та зуборізного довбача для отворів валів. Приведені технологічні засоби що до попередньої обробки крупногабаритних евольвентних шлицьових з'єднань втулок та валів з модифікацією зуборізного інструменту, що дозволяє після попередньої обробки проводити чистову обробку тільки евольвентних поверхонь без западини зубів, що забезпечує точність, якість та продуктивність евольвентних шлицьових з'єднань (ЕШЗ) без припасування. Для забезпечення якості обробки та складання ЕШЗ розроблені технологічні засоби обробки крупногабаритних евольвентних шлицьових з'єднань з модифікацією зуборізного інструменту червячної фрези для валів та зуборізного довбача для отворів валів. На основі модифікацій аналітичним шляхом визначаються їх різноманітні поєднання необхідні і можливі для кожного конкретного поєднання вихідних параметрів оброблюваної поверхні.

Ключевые слова: крупногабаритні евольвентні шлицьові з'єднання, центруванням по бічних поверхнях зубів, втулки, вали, модифікація зуборізного інструменту, западина зубів, точність, якість, продуктивність.

*Е.П. СТАРЧЕНКО***ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ С МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИНСТРУМЕНТА**

Решением вопроса повышения точности, качества и производительности изготовления эвольвентных шлицевых соединений вместо прямобичным шлицевым соединением является совершенствование технологического оборудования и внедрение сверхскоростной обработки деталей за одну установку на высокоэффективном технологическом оборудовании. Технологические методы обработки крупногабаритных элементов эвольвентных шлицевых соединений путем внедрения прогрессивных схем зубообработки и усовершенствованного инструмента обеспечивают повышение производительности, точности и качества за счет соединений с модификацией зуборезного инструмента червячной фрезы для валов и зуборезного долбяка для отверстий валов. Приведены технологические средства, которые в предыдущей обработке крупногабаритных эвольвентных шлицевых соединений втулок и валов с модификацией зуборезного инструмента, позволяет после предварительной обработки проводить чистовую обработку только эвольвентных поверхностей без впадины зубов, обеспечивает точность, качество и производительность эвольвентных шлицевых соединений (ЭШС) без подгонки. Для обеспечения качества обработки и сборки ЭШС разработаны технологические средства обработки крупногабаритных эвольвентных шлицевых соединений с модификацией зуборезного инструмента червячной фрезы для валов и зуборезного долбяка для отверстий валов. На основе модификаций аналитическим путем определяются их разнообразные сочетания необходимые и возможные для каждого конкретного сочетания исходных параметров обрабатываемой поверхности.

Ключові слова: крупногабаритные эвольвентные шлицевые соединения, центрированием по боковым поверхностям зубов, втулки, вали, модификация зуборезного инструмента, впадина зубов, точность, качество, производительность.

*O. STARCHENKO***PROCESSING TECHNOLOGY OF LARGE-SIZED EVOLVENT SPLINE CONNECTIONS WITH MODIFIED TOOL PROFILES**

The solution to the issue of improving the accuracy, quality, and productivity of manufacturing involute splined joints instead of straight-line splined joints is the improvement of technological equipment and the introduction of ultra-high-speed machining of parts in one installation on highly efficient technological equipment. Technological methods for processing large-sized elements of involute splined joints by introducing progressive gearing schemes and an improved tool provide increased productivity, accuracy, and quality due to connections with a modification of a gear cutting tool for a worm cutter for shafts and a gear cutting cutter for shaft openings. Technological tools are presented which, in the previous processing of large-sized involute splined joints of bushings and shafts with a modification of a gear cutting tool, allow after finishing to only finish involute surfaces without tooth cavities, which ensures accuracy, quality, and performance of involute splined joints (ESW) without fitting. To ensure the quality of processing and assembly of ESWs, technological means have been developed for processing large-sized involute splined joints with a modification of a gear cutting tool for a worm cutter for shafts and gear cutting cutter for shaft openings. Based on the modifications, their various combinations necessary and possible for each concrete combination of the initial parameters of the processed surface are determined analytically.

Keywords: large-sized involute splined joints, centering on the lateral surfaces of teeth, bushings, shafts, modification of a gear-cutting tool, tooth cavity, accuracy, quality, productivity.

1. Вступ. Для обробки зубів шлицьових з'єднань ГОСТ 6033-80 з центруванням по бічних поверхнях зубів (рис. 1) з піднутрінням під чистову обробку використовуються чорнові черв'ячні фрези і зуборізні довбачі без модифікацією головки зубів [1, 2, 3], що ускладнює чистову обробку з метою забезпечення точності та якості евольвентних шлицьових з'єднань (ЕШЗ) без припасування.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенням питання підвищення точності, якості та продуктивності виготовлення евольвентних шлицьових з'єднань натомість прямобічним шлицьовим з'єднанням є удосконалення технологічного обладнання та впровадження надшвидкісної обробки деталей за одну установку на високоефективному технологічному обладнанні.

© О.П. Старченко, 2018

В важких верстатах застосовувалися прямобічні шліцьові з'єднання при центруванні по внутрішньому діаметру, що вимагало значних витрат для забезпечення якості виготовлення таких з'єднань при застосуванні складного і дорогого обладнання, інструменту, контрольних засобів (горизонтально-протяжні верстати, шліцефрезерні та шліцешліфувальні верстати, комплекти протяжок, що складаються з двох, частіше з трьох протяжок, спеціальні шліцьові фрези, шліфувальні круги, калібри для отворів і валів).

Елементи шліцьових з'єднань становлять значну частку продукції машинобудування серед великої різноманітності інших виробів. Та не зважаючи на це, середня трудомісткість операцій по обробці зовнішнього та внутрішнього шліцьового профілю різанням, в прийнятих на даний час технологічних процесах, становить 50-60% від загальної трудомісткості виготовлення деталей, що містять поверхні шліцьового профілю. Крім того, прийняті на даний момент методи, що застосовуються для отримання таких поверхонь, потребують значних матеріальних та часових затрат на проектування та виготовлення спеціального, досить складного та дорого у виготовленні інструменту [4, 5, 6, 7]. Тому удосконалення існуючих методів шліцеобробки, а також розробка і впровадження нових, прогресивних технологічних процесів має велике значення.

Метою даної статті є розробка нових технологічних рішень стосовно обробки великогабаритних евольвентних шліцьових з'єднань натомість прямобічним шліцьовим з'єднанням, спрямованих на підвищення продуктивності, якості та зниження матеріальних і трудових затрат на їх виготовлення [8, 9, 10].

Основна частина. Вихідний контур і форма зубів шліцьових з'єднань і основні залежності для визначення їх розмірів повинні відповідати зазначеним на рис. 1 - рис. 3 ГОСТ 6033-80. При центруванні по зовнішньому діаметру допускається застосовувати центрування по внутрішньому діаметру з забезпеченням вимог допусків і посадок при центруванні по зовнішньому та внутрішньому діаметрам.

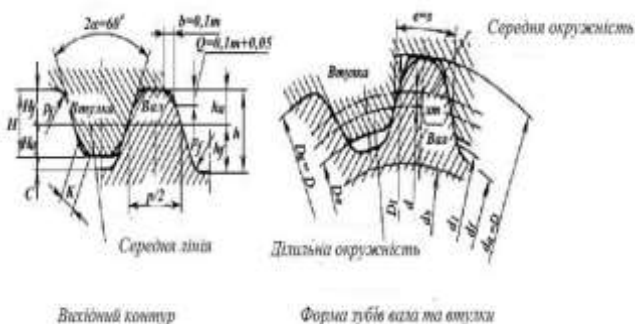


Рисунок 1 – Центрування по зовнішньому діаметру

Загальна технологія обробки великогабаритних евольвентних шліцьових з'єднань (ЕШЗ) з модифікованим профілем практично не залежить від

послідовності виконання технологічних операцій, але залежить від застосовуваного інструменту та способів контролю ЕШЗ залежно від виду центрування. Також допускається застосовувати поєднання профілів зубів вала і втулки з різною формою дна западини. На поверхні вершин зубів вала, отриманих методом накатки, допускаються поглиблення.

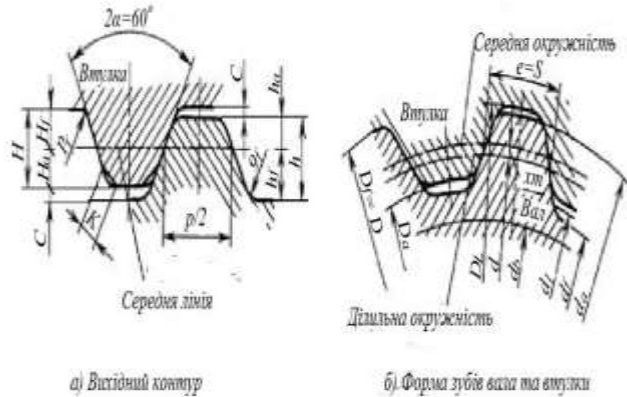


Рисунок 2 – Центрування по бокових поверхнях зубів (плоска форма дна западини)

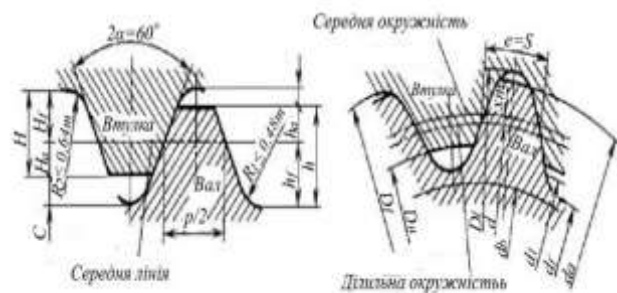


Рисунок 3 – Центрування по бокових поверхнях зубів (закруглена форма дна западини); центрування по внутрішньому діаметру

Найбільший вплив на структуру операцій в технологічному процесі мають рівень точності і шорсткість поверхні зубів, вид термічної обробки та ін. Підвищена точність викликає додаткові фінішні операції по обробці базових поверхонь заготовки, профілів зубів, а також впливає на режим обробки, якість технологічного оснащення і ріжучого інструменту [7, 10].

При зубофрезеруванні черв'ячна фреза утворює з оброблюваної заготовкою гвинтове верстатне зачеплення. Зубофрезерні станки з ЧПУ в більшості випадків мають кінематичну схему, зображену на рис. 4.

Всі формотворчі рухи цього верстата по осях координат X, Y, Z, A, B, C здійснюються від окремих регульованих електродвигунів: M_x (через гвинт 1) – переміщення інструментальної стійки 2 для зміни міжосьової відстані; M_y (через гвинт 4) – переміщення фрезерного супорта уздовж осі заготовки; M_z (через гвинт 5) – переміщення фрезерної каретки 6 уздовж осі інструменту; M_c – обертання інструменту 7; M_b (через ділильну передачу 9) – обертання столу 8 із заготовкою. Електродвигун M_a через черв'ячну

передачу 3 виконує поворот супорта з фрезою на необхідний кут.

Застосування системи ЧПУ для управління зубофрезерування дозволяє будувати гнучкі виробничі модулі (ГВМ) з повною автоматичної переналадження, що включає в себе зміну інструменту, оснастки, заготовки та перебудову всіх внутрішніх зв'язків за параметрами обробки.

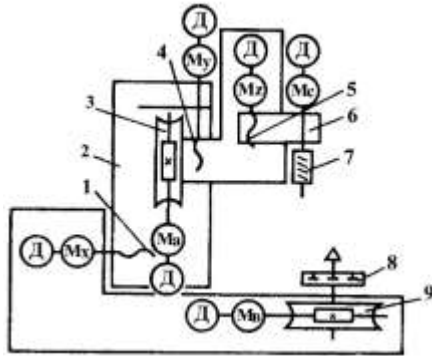


Рисунок 4 – Принципова схема зубофрезерного станка з ЧПУ

Найчастіше шліцьові вали обробляють на верстатах з горизонтальним розташуванням осі заготовки, які оснащують лонетами, а також головками для кріплення пальцевих фрез.

Залежно від призначення і розмірів оброблюваної деталі застосовують черв'ячні фрези (ГОСТ6637-80) наступних класів точності: AAA, AA, A, B, C і D і використовуються для нарізування шліцьових поверхонь 6-9 ступенів точності. Найбільшого поширення для обробки шліців отримали одно- і багатозахідні, збірні і тврдосплавні черв'ячні фрези [6, 7].

У машинобудуванні тврдосплавні черв'ячні фрези знаходять все більш широке застосування, головним чином для нарізування шліцьових валів твердістю близько HB 300. Застосовують збірні фрези з ромбовидними різцями марки T15K6.

Режими різання черв'ячними фрезами зазвичай призначають виходячи з мінімальних витрат на зубообробку. При цьому за основу беруть значення стійкості і зносу фрези по задній поверхні.

Чорнова обробка внутрішніх шліцьових поверхонь виконується методом зубодовбання. Зубодовбання – основний спосіб обробки внутрішніх зубів шліцьових поверхонь. Основна перевага зубодовбання в порівнянні з обробкою черв'ячної фрезою – менша огранювання евольвентного профілю шліцьових отворів з малим числом зубів.

Принципова схема зубодовбального верстата зображена на рис. 5.

В процесі обробки інструментальний шпиндель з довбачем здійснюють швидкий зворотно-поступальний рух зі швидкістю v_1 , частота якого встановлюється за допомогою гітари або коробки швидкостей 5, що приводиться в рух від головного двигуна M. Інструментальний 1 і робочий 2 шпинделі

верстата здійснюють повільне синхронне обертання ω_1 та ω_2 . Відносні частоти їх обертання (обкатка) налаштовуються за допомогою гітари ділення 9.

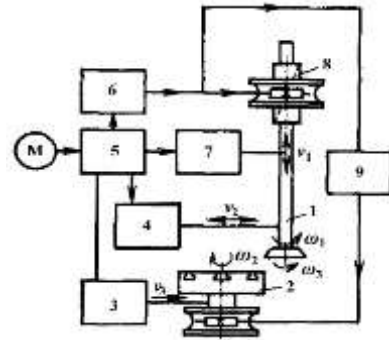


Рисунок 5 – Принципова схема зубодовбального верстата з механічними кінематичними зв'язками

Випускають верстати, оснащені системами ЧПУ, які пов'язують всі рухи виконавчих органів верстата. Ці верстати характеризуються високою якістю і високою продуктивністю обробки. Такі верстати працюють в автоматичному циклі, що включає зміну інструменту і оснастки; наладку на виготовлення нового виробу із заміною оснащення виконують перемиканням програми; верстати мають адаптивну систему управління по коливанню умов обробки, забезпечують модифікацію поздовжнього профілю зубів виробу, можуть вбудовуватися в автоматичні лінії і ГПС.

Зуборізні довбачі по конструктивно-технологічним ознаками діляться на дискові, чашкові, втулкові і хвостові та виготовляються трьох класів точності: класу AA – дискові і чашкові довбачі з d_0 від 75 до 200 мм; класів A і B – дискові, чашкові та хвостові довбачі з d_0 від 25 до 200 мм.

Рекомендоване призначення довбачі: класу AA – для поверхонь 6-го ступеня точності; класу A – для поверхонь 7-го ступеня точності; класу B – для поверхонь 8-й ступеня точності. Твердість ріжучої частини долбачів на передній грані повинна бути в межах HRC₃ 62-65.

Практична цінність полягає в тому, що у важких верстатах застосовувалися прямобічні шліцьові з'єднання при centruванні по внутрішньому діаметру, що вимагало значних витрат для забезпечення якості виготовлення таких з'єднань при застосуванні складного і дорогого обладнання: горизонтально-протяжних верстатів, шліцефрезерних та шліцешліфувальних верстатах, комплектів протяжок, що складаються з двох, частіше з трьох протяжок, спеціальні шліцьові фрези, шліфувальні круги, калібри для отворів і валів).

Висновки. Вирішені питання підвищення точності, якості та продуктивності виготовлення евольвентних шліцьових з'єднань натомість прямобічним шліцьовим з'єднанням за рахунок удосконалення технологічного обладнання та впровадження надшвидкісної обробки деталей за одну установку на високоефективному технологічному

обладнанні.

У важких верстатах застосовувалися прямобічні шліцьові з'єднання при центруванні по внутрішньому діаметру, що вимагало значних витрат для забезпечення якості виготовлення таких з'єднань при застосуванні складного і дорогого обладнання, інструменту, контрольних засобів (горизонтально-протяжні верстати, шліцефрезерні та шліцешліфувальні верстати, комплекти протяжок, що складаються з двох, частіше з трьох протяжок, спеціальні шліцьові фрези, шліфувальні круги, калібри для отворів і валів).

Список литературы

1. Анділахай О.О., Ключко О.О., Камчатна-Степанова К.В., Старченко Є.П. *Технологічні засоби обробки крупногабаритних евольвентних шліцьових з'єднань з модифікацією зуборізного інструменту: Машинобудування і зварювальне виробництво / Наука та виробництво: міжвузівський тематичний збірник наукових праць. – Мариуполь: ДВУЗ «ПДТУ», 2019. – Вип. 19. – С.50–63.*
2. Заковоротний О.Ю., Ключко О.О., Старченко О.П., Камчатна-Степанова К.В. Андиферова О.О. *Підвищення точності, якості та продуктивності обробки крупногабаритних евольвентних шліцьових поверхонь. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 04 – 07 липня 2019 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 36 – 37. ISBN 978-966-379-853-0.*
3. Веселовська Н.Р., Скоркін О.А., Котляр О.В., Ключко О.Ю., Старченко О.П. *Інформаційний фонд релевантності конструкторсько-технологічних видів крупногабаритних з'єднань для передачі крутного моменту // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 34 (1310) 2018. – С. 77–83. – ISSN 2079-004X.*
4. ГОСТ 6033–80 *Основные нормы взаимозаменяемости. З'єднання шліцьові евольвентні з кутом профілю 30 °. Розміри, допуски і вимірювані величини. – Замість ГОСТ 6033–51; введ. 01.01.1982. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 86 с.*
5. *Технологія машинобудування: В 2 кн. Кн. 2. Виробництво деталей машин: Навч. посіб для вузів / Е.Л. Жуков, І.І. Козарь, С.Л. Мурашкин і др.; Під ред. С.Л. Мурашкина. – М.: Виш. шк., 2003. – 295 с.*
6. ГОСТ 6637–80 *Фрезы червячные чистовые для шлицевых валов с эвольвентным профилем. Технические условия. – Взамен ГОСТ 6637–53; введ. 01.01.1982. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 22 с.*
7. ГОСТ 6762–79 *Долбяки зуборезные чистовые для валов и отверстий шлицевых соединений с эвольвентным профилем. Технические условия. – Взамен ГОСТ 6762–65; введ. 01.01.1980. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 53 с.*
8. Крупина, Н. П. *Расчет инструментов для производства зубчатых колес, шлицевых валов и втулок. В 2 ч. – Ч. 1. / Н. П. Крупина. – Челябинск, 2008. – 284 с.*
9. Струтинський В.Б., Дем'яненко А.С. *Наукове обґрунтування та розробка системи моніторингу фактичного просторового положення інструменту верстата паралельної кінематики. – Технологічні комплекси, 2013, № 1(7), с. 71–79.*
10. *Технологія виготовлення зубчатих колес / Калашников А.С. – М.:*

Машиностроение, 2004. – 480 с. ил.

References (transliterated)

1. Andilakhaj O.O., Klochko O.O., Kamchatna-Stepanova K.V., Starchenko E.P. *Tekhnologični`chni` zasobi obrobki krupnogabaritnikh evol`ventnikh shli`cz`ovikh z'yednan` z modifi`kaczi`vej zubori`znoho i`nstrumentu: Mashinobuduvannya i` zvaryval`ne virobnicztvo [Technological means of processing large-sized involute spline connections with modification of a gear-cutting tool: Mechanical engineering and welding production] Nauka ta virobnicztvo : mi`zhvuzi`vs`kij tematichnij zbi`rnik naukovikh prac`. Mariupol', DVUZ «PDTU», 2019. Vol. 19. pp.50–63*
2. Zakovorotnij O.Yu., Klochko O.O., Starchenko O.P., Kamchatna-Stepanova K.V. *Anciferova O.O Pi`dvishhennya tochnosti`, yakosti` ta produktivnosti` obrobki krupnogabaritnikh evol`ventnikh shli`cz`ovikh poverkhon`. [Improving the accuracy, quality and productivity of machining large involute spline surfaces] Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi`ali Mi`zhnarodnoyi nauko-ve-tekhni`chnoyi konferenczi`yi 04 – 07 lipnya 2019 roku. Pi`d zag. red. V. D. Koval`ova. Kramators`k: DDMA, 2019.pp. 36 – 37. ISBN 978-966-379-853-0.*
3. Veselovs`ka N.R., Skorki`n O.A., Kotlyar O.V., Klochko O.Yu., Starchenko O.P. *Ġnformaczi`jni` fond relevantnosti` konstruktors`ko-tehnologičnikh vidi`v krupnogabaritnikh z'yednan` dlya peredachi` krutnogo momentu [Information fund of relevance of design and technological types of large joints for torque transmission] Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhničnogo uni`versitetu «KhPI». Seri`ya: Tekhnologič`yi v mashinobuduvanni` = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. Nacz. tekhn. un-t «Kharki`v. poli`tekh. i`n-t». Kharki`v : NTU «KhPI», 2018. No 34 (1310) 2018. pp. 77–83. – ISSN 2079-004Kh.*
4. *GOST 6033–80 Osnovni` normi vzayemozami`nnosti`. Z'yednannya shli`cz`ovi` evol`ventni` z kutom profi`lyu 30 ° [Basic interchangeability standards. The splines are involute with a profile angle of 30 °]. Rozmi`ri, dopuski i` vimi`ryuvani` velichini. – Zami`st` GOST 6033–51; vved. 01.01.1982. Moskov. Vidavnicztvo standartiv, 2005. 86 p.*
5. *Tekhnologič`ya mashinobuduvannya [Engineering technology] Vol. 2 kn. Kn. 2. Virobnicztvo detal`ej mashin: Navch. posi`b dlya vuzi`v / E.L. Zhukov, Ġ.Ġ. Kozar`, S.L. Murashkin i dr.; Pi`d red. S.L. Murashkina. Moscow Vishh. shk., 2003. 295 p.*
6. *GOST 6637–80 Frezy` chervyachny`e chistovy`e dlya shliczevy`kh valov s evol`ventny`m profilem [Finishing worm mills for splined shafts with involute profile]. Tekhnicheskie usloviya. – Vzaмен GOST 6637–53; vved. 01.01.1982. Mj`scov IPK Izdatel`stvo standartov, 1996. 22 p.*
7. *GOST 6762–79 Dolbyaki zuborezny`e chistovy`e dlya valov i otverstij shliczevy`kh soedinenij s evol`ventny`m profilem. Tekhnicheskie usloviya [Finishing cutters for shafts and holes of splined joints with involute profile]. Vzaмен GOST 6762–65; vved. 01.01.1980. Modcov IPK Izdatel`stvo standartov, 1996. 53 p.*
8. *Krupina, N. P. Raschet instrumentov dlya proizvodstva zubchaty`kh koles, shliczevy`kh valov i vtulok [Calculation of tools for the production of gears, splined shafts and bushings]. V 2 ch. Ch. 1. / N. P. Krupina. Chelyabinsk, 2008. 284 p.*
9. *Strutins`kij V.B., Dem`yanenko A.S. Naukove obg`runtuvannya ta rozrobka sistemi moni`toringu faktichnogo prostорового polozhennya i`nstrumentu verstata paralel`noyi ki`nematiki. [Scientific substantiation and development of the system for monitoring the actual spatial position of the parallel kinematics machine tool] Tkhnologič`chni` kompleksi, 2013, No 1(7), pp. 71–79.*
10. *Kalashnikov A.S. Tekhnologiya izgotovleniya zubchaty`kh koles [Gear manufacturing technology] Moscov, Mashinostroenie, 2004. 480 p*

Поступила (received) 03.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Старченко Олена Павлівна (Старченко Елена Павловна, Olena Pavlovna) – Заступник директора з навчальної роботи Харківського радіотехнічного коледжу, м. Харкові, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7444-6668>; тел.: (057) 731-25-22; e-mail: Olena7200@ukr.net

ЗМІСТ

Костюк Г. И., Попов В. В., Евсеенкова А. В. Влияние температурных напряжений и скорости деформирования на возможность образования наноструктур в твердых сплавах ВК10, ВК10 модифицированного и ВК20.....	3
Жуков А.Н. Формализация поиска рационального варианта технологии формирования функциональных покрытий на рабочих поверхностях торцевых импульсных уплотнений.....	11
Тарельник В.Б., Саржанов Б.А. Экологически безопасный способ восстановления и одновременного упрочнения стальных деталей, изготовленных из металлических листов.....	16
Гайдамака А.В., Крутіков Г.А., Стрижак М.Г. Гідропневмопривод: вчора, сьогодні, завтра.....	22
Полянский В.И. Взаимосвязь параметров теплового процесса при глубинном шлифовании с качеством обработки.....	28
Ковалевська О.С., Ковалевський С.В. Моделі ідентифікації механізмів паралельної структури.....	34
Костюк Г.И., Попов В. В. Повышение ресурса и надёжности деталей из циркониевых сплавов за счёт нанесения нанопокровов и образования наноструктур.....	40
Скоркін А.О., Кондратюк О.Л., Старченко О.П., Протопопова А.С. Дослідження кінематики лінії різь шліфувального круга, встановленого на гідрошпинделі.....	51
Ковалевський С.В., Ковалевська О.С. Підвищення якості технологічної системи механообробки.....	56
Немировский Я. Б., Посвятенко Э. К., Росточкий И. Ю., Цеханов Ю. А. Особенности контактных явлений при деформирующем протягивании с использованием твердых смазок.....	61
Губський С.О., Чухліб В.Л., Біба М.В., Окунь А.О., Басова Є.В. Порівняння результатів моделювання прокатки в різних сае-системах.....	69
Старченко О.П. Технологія обробки крупногабаритних евольвентних шліцьових з'єднань з модифікованим профілем інструмента.....	73

CONTENTS

Kostyuk G., Popov V., Yevseyenkova A. The effect of temperature stress and strain rate on the possibility of nanostructure formation in VK10, BK10 modified and BK20 hard alloys.....	3
Zhukov A. Formalization of the rational variant search of the forming functional coatings technology on the face impulse seals working surfaces.....	11
Tarel'nyk V., Sarzhanov B. Environmentally safe method of restoration and simultaneous strengthening of steel parts manufactured from metal sheets.....	16
Haidamaka A., Krutikov G., Strizhak M. Hydropneumobox: yesterday, today, tomorrow.....	22
Polyansky V. Interrelation of heat process parameters during depth grinding with treatment quality.....	28
Kovalevska O., Kovalevskyy S. Models of identification of parallel structure mechanisms.....	34
Kostyuk G., Popov V. Improving the resource and reliability of details from zirconium alloys during the application of nanocoating and formation of nanostructures.....	40
Skorkin A., Kondratiuk O., Starchenko O., Protopopova A. Studies of the kinematics of the grinding wheel cutting line mounted on electrical spindles.....	51
Kovalevskyy S., Kovalevska O. Improving the quality of technological system of mechanical processing.....	56
Nemyrovskiy Ya., Posvyatenko E., Rostotskiy I., Tsekhanov Yu. Features of contact events during deforming broaching using solid lubricants.....	61
Gubskiy S., Chuhlib V., Biba M., Okun A., Basova Ye. Comparison of the release of rolling simulation in different cae systems.....	69
Starchenko O. Processing technology of large-sized evolvent spline connections with modified tool profiles.....	73

ДЛЯ НОТАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХП».
СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ**

Збірник наукових праць

№ 19 (1344) 2019

Наукові редактори: Пермяков О.А., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХП», Україна
Клочко О. О., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХП», Україна
Технічний редактор: Басова Є.В., канд. техн. наук, НТУ «ХП», Україна

Відповідальний за випуск Шайда В.П., канд. техн. наук

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

Обл.-вид № 13–44.

Підп. до друку 15.06.2019 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. № 301133. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК № 5478 від 21.08.2017 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