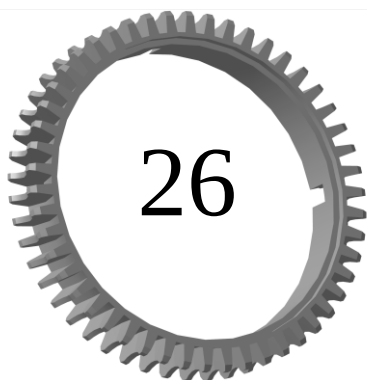




ISSN 2079 – 1747
DOI 10.32820/2079-1747-2020-26

Міністерство освіти і науки України
Українська інженерно-педагогічна
академія

Галузеве машинобудування
Матеріалознавство
Прикладна механіка

Машинобудування

Engineering

Збірник наукових праць
Видається 2 рази на рік
Видається з грудня 2007 р.

Industry engineering
Material Science
Applied mechanics

Збірник наукових праць
«Машинобудування» входить до
Категорії Б наукових фахових
видань, включених до Переліку
наукових фахових видань України
(технічні науки), в яких можуть
публікуватися результати
дисертаційних робіт на здобуття
наукових ступенів доктора наук і
доктора філософії (кандидата наук)
наказ МОН України №409 від
17.03.2020.

УІПА

Редакційна колегія:**Головний редактор**

Купріянов О. В., д.тех.н., доц.

Заступник головного редактора:

Фідровська, Н. М., д.тех.н., проф.

Члени колегії:

Гордєєв А. С., д.тех.н., проф.

Григоров О. В., д.тех.н., проф.

Залога В.О., д.тех.н., проф.

Ларшин В. П., д.тех.н., проф.

Литвин О. М., д. физ.-мат. н., проф.

Ловейкін В. С., д.тех.н., проф.

Петраков Ю.В., д.тех.н., проф.

Ромасевич Ю.О., д.тех.н., доц.

Соколов В. І., д.тех.н., проф.

Хавін Г. Л., д.тех.н., проф.

Alper Uysal, Ph.D., Assoc. Prof.

Dagmar Caganova, Ph.D., Assoc. Prof.

Dimitar Dichev, D.Sc., Prof.

Milan Edl, Ph.D., Assoc. Prof.

Predrag Dasic, D.Sc., Prof.

Відповідальні редактори

Подоляк О.С., к.тех.н., доц.

Сичов Ю.І., к.тех.н., доц.

Чернишенко О.В., к.тех.н.

Випусковий редактор

Соболь Л.А.

Відповідальний секретар

Соболь Л.А.

Адреса редакції:

Україна, 61003, м. Харків

вул. Університетська, 16

Українська інженерно-педагогічна академія

Тел. (057)733-79-17

Факс (057)731-32-36

E-mail: mashynobuduvannia@uipa.edu.ua

<http://jmash.uipa.edu.ua>

Address of editorial office:

16 Universitetska vul., Kharkiv

61003, Ukraine

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy

Tel. (057)733-79-17

Fax (057)731-32-36

Машинобудування

2020, № 26

Збірник наукових праць

Засновник

Українська інженерно-педагогічна академія
(УІПА)

Видається з грудня 2007 р.

Свідоцтво про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
Серія KB № 12132 – 1016Р від 26.12.2006.
ISSN 2079 – 1747
DOI 10.32820/2079-1747-2020-26

Мови видання:

українська, англійська

Друкується за рішенням Вченої ради УІПА,
протокол № 6 від 22.12.20 р

При використанні матеріалів збірника посилання
на збірник – обов'язкове.

Журнал відображено у базах даних:

Національна бібліотека України імені

В. І. Вернадського – <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/>

Bielefeld Academic Search Engine –

<https://www.base-search.net/>

Index Copernicus – <http://www.indexcopernicus.com/>

Google Scholar – <http://scholar.google.com.ua/>

OpenAIRE (Open Access Infrastructure for Research
in Europe) – <https://www.openaire.eu/>

WorldCat – <https://www.worldcat.org/>

© Українська інженерно-педагогічна академія
(УІПА), Харків, 2020

Шановні автори публікацій!

Редакційна колегія збірника «Машинобудування» вживає заходів щодо підвищення якості нашого видання, спрямовані на входування в провідні світові наукометричні бази. З цією метою сайт збірника перенесений на платформу Open Journal Systems і впроваджується незалежне рецензування рукописів, що подаються до публікації. Збірник «Машинобудування» тепер має власний сайт, який розташовується за посиланням: <http://jmash.uipa.edu.ua>

Використання платформи Open Journal Systems дозволяє автоматизувати весь видавничий процес: подачу рукописів авторами, рецензування, внесення редакторських правок, розміщення статей у відкритому доступі і їх подальше індексування наукометричними базами. Ми починаємо приймати рукописи через сайт збірника, і надавати там результати рецензування. Для цього всі учасники видавничого процесу, від авторів до рецензентів і редакторів, повинні зареєструватися на сайті. Сайт доступний в трьох мовних версіях: українська, російська та англійська, тому у наших іноземних авторів не повинно бути мовних проблем. На час перехідного періоду рукописи приймаються і за старою схемою, але давайте разом освоювати перспективну редакторську платформу.

З метою забезпечення високої якості видавання, статі, які отримали низьку оцінку рецензентів, не будуть опубліковані. У разі виникнення труднощів, пишіть нам на E-mail: mashynobuduvannia@uipa.edu.ua.

Запрошуємо фахівців в галузі машинобудування брати участь у рецензуванні, в процесі реєстрації на сайті збірника є можливість подати запит на додавання в рецензенти.

Ми докладаємо зусиль по розширенню географії авторів, і запрошуємо як українських, так і зарубіжних авторів подавати рукописи до збірника. При подачі статті слід стежити за правилами оформлення та академічною доброчесністю.

Давайте разом постійно покращувати наш збірник з метою вивести його в лідери машинобудівного напрямку!

Головний редактор

Купріянов Олександр Володимирович

Dear Authors,

The editorial board of the journal "Engineering" is taking steps to improve the quality of our publication with the aim of entering the world's leading scientometric databases. Accordingly, the website of the journal is moving to the Open Journal Systems platform and an independent review of manuscripts submitted for publication is being introduced. The journal "Engineering" now has its own website, which you can visit following the link <http://jmash.uipa.edu.ua>.

Using the Open Journal Systems platform allows automating the entire publishing process, which includes submitting manuscripts by authors, reviewing, editing, publishing articles in the open access, and then indexing them by scientometric databases. We are beginning to accept manuscripts via the website of the journal, which is where we are also starting to present the results of reviewing. To this end, all participants in the publishing process, from authors to reviewers and editors, must register on the website. The website is available in three languages: Ukrainian, Russian and English, so our foreign authors will not encounter any language-related problems. During the transition period, the manuscripts are still accepted according to the previous scheme, but let us start exploring this promising editorial platform together.

In order to ensure high quality of published articles, those papers which have received a low rating from reviewers will not be published. In case of technical difficulties, please email us at mashynobuduvannia@uipa.edu.ua.

We are inviting specialists in the field of mechanical engineering to take part in reviewing; for this purpose, while registering on the website of the journal there is an opportunity to submit a request to become a reviewer.

We are making efforts to expand the geography of the authors, so we are inviting both Ukrainian and foreign authors to submit manuscripts to the journal. When submitting an article, you should follow the guide for authors and the rules on academic honesty.

Let us together constantly improve our journal in order to make it a leader in the field of mechanical engineering.

Oleksandr Kupriyanov

Editor-in-Chief

Уважаемые авторы публикаций!

Редакционная коллегия сборника «Машиностроение» предпринимает шаги по повышению качества нашего издания, направленные на вхождение в ведущие мировые наукометрические базы. С этой целью сайт сборника перенесен на платформу Open Journal Systems и вводится независимое рецензирование подаваемых к публикации рукописей. Сборник «Машиностроение» теперь имеет собственный сайт, который располагается по ссылке: <http://jmash.uipa.edu.ua>

Использование платформы Open Journal Systems позволяет автоматизировать весь издательский процесс: подачу рукописей авторами, рецензирование, внесения редакторских правок, размещение статей в открытом доступе их последующее индексирование наукометрическими базами. Мы начинаем принимать рукописи через сайт сборника, и предоставлять там результаты рецензирования. Для этого все участники издательского процесса, от авторов до рецензентов и редакторов, должны зарегистрироваться на сайте. Сайт доступен в трех языковых версиях: украинский, русский и английский, поэтому у наших иностранных авторов языковых проблем быть не должно. На время переходного периода рукописи принимаются и по старой схеме, но давайте вместе осваивать перспективную редакторскую платформу.

С целью обеспечения высокого качества издаваемых статей, получившие низкую оценку рецензентов материалы не будут опубликованы. В случае технических трудностей, пишите нам на E-mail: mashynobuduvannia@uipa.edu.ua

Приглашаем специалистов в области машиностроения участвовать в рецензировании, в процессе регистрации на сайте сборника есть возможность подать запрос на добавление в рецензенты.

Мы прикладываем усилия по расширению географии авторов, и приглашаем как украинских, так и зарубежных авторов подавать рукописи в сборник. При подаче статьи следует следить за правилами оформления и академической добросовестностью.

Давайте вместе постоянно улучшать наш сборник с целью вывести его в лидеры машиностроительного направления!

Главный редактор

Куприянов Александр Владимирович

<u>Галузеве машинобудування</u>	5
Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Муштин Д.І. Розробка системи оптимального керування механізмами зміни вильоту вантажу та повороту баштового крана.....	5
Фідровська Н.М., Слепужніков Є.Д, Перевозник І.А. Експериментальні дослідження віброприскорень у вертикальному напрямі на модернізованих ходових колесах вантажного візка мостового крана.....	18
<u>Матеріалознавство</u>	33
Стрельчук Р. М., Дослідження зносу кругів при електроерозійному алмазному шліфуванні зі змінною полярністю електродів в зоні різання.....	33
Курпе О.Г., Кухар В.В., Присяжний А.Г. Вдосконалення превентивних заходів забезпечення стабільності технології та параметрів якості плоского прокату.....	45
<u>Прикладна механіка</u>	57
Гордєєв А.С. Стандартизація технологічних процесів цифрового друку.....	57
Ізотова К.О. Підвищення продуктивності електродів з основним видом покриття.....	65
Калін М.А. Особливості розкислення електродного металу вуглецем, пов'язаним в Fe-C сплав.....	73
Фролов Е.А., Муравльов В.В., Дерябкіна Є.С., Агарков В.В. Аналітичне визначення напружень в клейовому шарі з'єднання елементівнапрямної системи УСПШ.....	79
До уваги авторів.....	89

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-5-17

УДК 621.873

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМАМИ ЗМІНИ ВИЛЬОТУ ВАНТАЖУ ТА ПОВОРОТУ БАШТОВОГО КРАНА

©Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Муштин Д.І.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Інформація про авторів:

Ловейкін Вячеслав Сергійович; ORCID: 0000-0003-4259-3900; vloveykin@mail.ru; доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус № 11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна

Ромасевич Юрій Олександрович; ORCID: 0000-0001-5069-5929; romasevichyuriy@ukr.net; доктор технічних наук, доцент; професор кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус № 11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна

Муштин Денис Іванович; ORCID: 0000-0003-2416-1565; denismushtyn@gmail.com; інженер; аспірант кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус № 11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна

Проведено розробку структурно-функціональної блок-схеми системи оптимального керування механізмами зміни вильоту вантажу та повороту баштового крана. Виконано детальний опис окремих функціональних блоків схеми та їх логічний зв'язок. Робота системи керування за представленою структурно-функціональною блок-схемою полягає у проведенні діагностичних операцій апаратної та програмної частин системи, попередньому розрахунку діаграм швидкостей механізмів, їх уточненні із врахуванням оптимальних законів руху механізмів (ця операція виконується із врахуванням обмежень зі сторони частотно-керованого приводу механізмів крана). Остання операція у алгоритмі пов'язана із реалізацією руху механізмів крана за уточненими діаграмами та коригуванні кінцевого положення вантажу у площинах руху візка по стрілі і повороту крана. Система керування дає змогу реалізувати оптимальні закони руху механізмів із врахуванням фактичних фазових координат динамічної системи, особливостей частотно-керованого приводу механізмів та забезпечує усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі.

Крім того, було наведено рекомендації стосовно вибору мікроконтролера, датчиків та частотних перетворювачів приводів механізмів повороту крана та переміщення візка, а також протоколу передачі даних між елементами системи керування. Детально наведено перелік обов'язкових функцій частотних перетворювачів, які виступають джерелами живлення приводів механізмів баштового крана, та мікроконтролерів, які виконують операції розрахунку керуючих сигналів, збору даних та взаємодії з оператором крана. Вказано виробників та лінійки пристроїв, які розроблені для умов експлуатації вантажопідйомної техніки. Для датчиків кутового та лінійного положень механізмів крана наведено вирази, які дають змогу визначити раціональну точність використовуваних датчиків (оптичних енкодерів).

Ключові слова: оптимальне керування, баштовий кран, поворот, зміна вильоту, датчики, частотний перетворювач.

Ловейкин В.С., Ромасевич Ю.А., Муштин Д.И. „Разработка системы оптимального управления механизмами изменения вылета и поворота башенного крана“.

Проведена разработка структурно-функциональной блок-схемы системы оптимального управления механизмами изменения вылета груза и поворота башенного крана. Выполнено детальное описание отдельных функциональных блоков схемы и их логическая связь. Работа системы управления по представленной структурно-функциональной блок-схеме заключается в проведении диагностических операций аппаратной и программной частей системы, предварительном расчете диаграмм скоростей механизмов, их уточнении с учетом оптимальных законов движения механизмов (эта операция выполняется с учетом ограничений со стороны частотно-управляемого привода механизмов крана). Последняя операция в алгоритме связана с реализацией движения механизмов крана по уточненным диаграммам и корректировке конечного положения груза в плоскостях движения тележки по стреле и поворота крана. Система управления позволяет реализовать оптимальные законы движения механизмов с учетом фактических фазовых координат динамической системы, особенностей частотно-управляемого привода механизмов и обеспечивает устранение колебаний груза на гибком подвесе.

Кроме того, были приведены рекомендации по выбору микроконтроллера, датчиков и частотных преобразователей приводов механизмов поворота крана и перемещения тележки, а также протокола передачи данных между элементами системы управления. Подробно приведен перечень обязательных функций частотных преобразователей, выступающих источниками питания приводов механизмов башенного крана, и микроконтроллеров, которые выполняют операции расчета управляющих сигналов, сбора данных и взаимодействия с оператором крана. Указано производители и линейки устройств, разработанных для условий эксплуатации грузоподъемной техники. Для датчиков углового и линейного положений механизмов крана приведены выражения, позволяющие определить рациональную точность используемых датчиков (оптических энкодеров).

Ключевые слова: оптимальное управление, башенный кран, поворот, изменение вылета, датчики, частотный преобразователь.

Loveikin V., Romasevych Y., Mushtyn D. "Development of the optimal control system of slewing and trolley movement mechanisms of a tower crane".

The development of the structural and functional block diagram of the optimal control system for the trolley movement and slewing mechanisms of a tower crane has been carried out. A detailed description of the individual functional blocks of the system and their logical connection is presented. The operation of the control system according to the presented structural and functional block diagram consists in carrying out diagnostic operations of the hardware and software parts of the system, preliminary calculation of the speed diagrams of the mechanisms, their correction taking into account the optimal laws of the mechanisms movement (this operation is performed taking into account the limitations of the frequency-controlled drive of the crane mechanisms). The last operation in the algorithm is connected with the implementation of the movement of the crane mechanisms according to the corrected diagrams and the adjustment of the final position of the load in the planes of the trolley movement (along the boom) and the slewing rotation of the crane. The control system allows one to implement the optimal laws of movement of the mechanisms, taking into account the actual phase coordinates of the dynamic system, the features of the frequency-

controlled drive mechanisms and ensures the elimination of oscillations of the load on a flexible suspension.

In addition, recommendations are given on the selection of a microcontroller, sensors and frequency inverters of drives of slewing and trolley movement, as well as a data transfer protocol between the elements of the control system. The list of mandatory functions of frequency inverters acting as power sources for the drives of the tower crane mechanisms and microcontrollers that perform the operations of calculating control signals, collecting data and interacting with the crane operator is given in detail. The manufacturers and ranges of devices designed for the operating conditions of hoisting machinery are presented. For the sensors of the angular and linear positions of the crane mechanisms, expressions are given to determine the rational accuracy of the sensors (optical encoders).

Keywords: optimal control, tower crane, slewing, trolley movement, sensors, frequency inverter.

Постановка проблеми

Оптимальне керування механізмами баштового крана, зокрема, механізмами повороту та зміни вильоту вантажу (переміщення візка), реалізується за допомогою спеціалізованої системи керування. Вона представляє собою апаратну та програмну частини, які у взаємодії реалізують всі можливості оптимального керування рухом механізмами на практиці. Перший етап у синтезі такої системи керування полягає у розробці концепції алгоритму її роботи. Вона представляє собою певну структуру блоків (окремих операцій), між якими встановлені функціональні зв'язки і дає змогу виконати загальний опис операцій по керуванню роботою механізмів із врахуванням оптимальних законів руху механізмів. Така схема є ланкою, яка пов'язує між собою роботу інженерів-розробників системи керування: технологів, механіків-конструкторів, електриків, програмістів та дизайнерів. Звичайно, подальша деталізація дозволить уточнювати технічне завдання на розробку системи оптимального керування. Однак, при цьому концепція структурно-функціональна схема змінюватися не буде, оскільки вона визначає найбільш раціональний спосіб реалізації оптимального керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У більшості робіт з оптимального керування рухом механізмів баштових кранів використано критерії швидкодії [1-12] та лінійно-квадратичні критерії [4, 11, 12]. Всі ці роботи характеризуються вимогою усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі.

У роботі [1] модель баштового крана представлена у вигляді системи чотирьох нелінійних диференціальних рівнянь, які описують поворот башти, рух візка по стрілі та коливання вантажу на гнучкому підвісі у двох площинах (вздовж руху візка та перпендикулярно напрямку його руху). У постановці задачі використані обмеження на швидкість і прискорення візка, а також на швидкість і прискорення башти. Для знаходження квазіоптимального за швидкістю керування автори розробили алгоритм, який визначає параметри заданих наперед (базисних) кусочних функцій руху окремих мас системи. Результати теоретичних досліджень були апробовані шляхом проведення експериментальних лабораторних досліджень, що, однак, не дало змогу встановити практичну застосовність отриманих результатів.

У роботі [2], в якій використана нелінійна модель сумісної роботи декількох механізмів крана (поворот крана, рух візка та підйом вантажу), обмеження накладаються на прискорення башти, візка та вантажу. Для знаходження мінімуму критерію швидкодії використано

градієнтний метод. Ця робота також не містить апробацій експериментальних досліджень у виробничих умовах, хоча теоретичні та лабораторні дані мають гарний збіг.

У статті [3] автори на основі спеціалізованого програмного забезпечення отримали оптимальні за швидкістю керування робочими рухами (обертання башти, підйом вантажу, пересування візка) баштового крана. Отримані результати можуть бути застосовані лише для випадків невеликих переміщень, оскільки задача розв'язана для випадку відсутності усталеного режиму руху механізмів. У роботі [4] автори розвинули підходи щодо усунення коливань вантажу обертових (у тому числі і баштових) кранів, використавши лінійно-квадратичний критерій оптимізації. Розв'язана у такій постановці задачі проілюстрована графічними залежностями. Крім того, у цій роботі були розроблені питання реалізації керування, зокрема, вказана структура керованого приводного механізму.

Стаття [5] присвячена розробці оптимального за швидкістю керування рухом механізму повороту крана на основі використання принципу максимуму Л.С. Понтрягіна [6]. Використовуючи нелінійні рівняння руху системи автори знайшли розв'язок задачі оптимальної швидкодії. Функцією керування була прийнята величина пропорційна до прискорення візка. Через це практична реалізація результатів роботи може викликати ускладнення.

У роботі [7] цей же метод використано для задачі оптимізації швидкодії повороту баштового крана. Однак, тут використана лінійна модель руху системи.

У роботі [8] було знайдено наближений розв'язок задачі оптимального за швидкістю керування механізмом повороту баштового крана. Модель, яка використана у розрахунках, є нелінійною із змінними параметрами (довжина гнучкого підвісу). Це досить сильно ускладнило методику розв'язування та не дозволило у кінцевому випадку знайти її точний розв'язок. Проведений у роботі аналіз підходів привів авторів до висновку, що неможливість зведення математичної моделі системи до нормальної форми не дала змогу застосувати принцип максимуму Л.С. Понтрягіна.

У роботі [9] на основі результатів, які отримані для механізмів поступального переміщення крана [10] і які ґрунтуються на методі Л.С. Понтрягіна, було запропоновано компенсувати силу Коліоліса, яка виникає при повороті крана. Це дало змогу отримати оптимальний за швидкістю закон руху механізму повороту крана фактично без розв'язання задачі. У статті також наведено рекомендації стосовно реалізації оптимального керування за допомогою засобів керованого асинхронного електроприводу.

У роботі [11] на основі рівнянь Лагранжа другого роду отримана математична модель баштового крана, яка, будучи представленою у матричному вигляді, описує поворот башти, рух візка, підйом вантажу та його коливання у двох площинах. Використовуючи метод конструювання оптимальних регуляторів, автори роботи звели задачу мінімізації лінійно-квадратичного функціоналу до системи рівнянь Рікатті. Однак, застосовуючи критерій, автори роботи не пояснили його фізичну сутність. Отримані у ході розрахунків результати були проаналізовані за допомогою побудованих графічних залежностей.

У дисертаційній роботі A.L. Galafshani [12] побудовано математичну модель баштового крана та виконано постановку оптимізаційної задачі усунення коливань вантажу на гнучкому підвісі за умови мінімізації інтегрального функціоналу, який відображав квадратичні значення фазових координат руху системи. На положення окремих мас системи та їх швидкості були накладені обмеження. Аналіз отриманих результатів показав, що деякі з них неможливо реалізувати на практиці.

Таким чином, у більшості робіт з оптимального керування рухом механізмів баштового крана використані нелінійні математичні моделі руху зведених мас. Крім того, теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження проведені лише для параметрів лабораторних моделей баштових кранів, що ускладнює їх апробацію для реальних вантажопідйомних машин. Остання, у свою чергу, передбачає розробку структурно-функціональної схеми системи керування механізмами крана.

Постановка мети та завдань дослідження

Метою роботи є розробка структурної схеми системи оптимального керування механізмами зміни вильоту вантажу та повороту крана, а також рекомендацій стосовно її апаратної частини. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) виконати розробку схеми системи оптимального керування механізмами зміни вильоту вантажу та повороту крана; 2) розробити рекомендації стосовно апаратної частини системи (мікроконтролера, протокола передачі даних, датчиків та частотних перетворювачів).

Виклад основного матеріалу

Для системи керування механізмами повороту крана та переміщення візка на стрілі структурно-функціональну схему системи оптимального керування можна представити у вигляді блок-схеми, яка зображена на рис. 1.

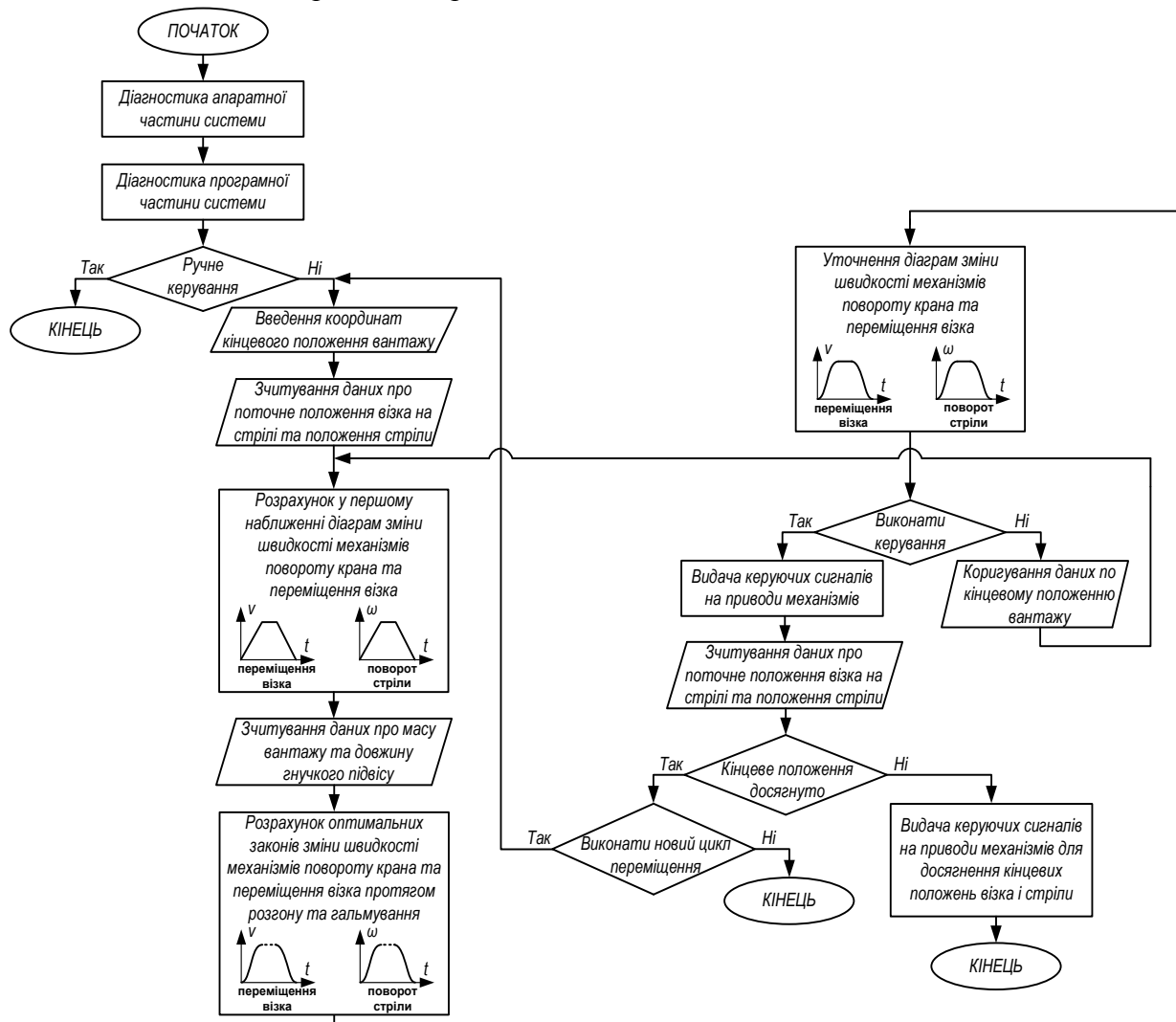


Рис. 1 – Структурно-функціональна блок-схема роботи системи оптимального керування механізмами зміни вильоту вантажу та повороту крана

Опишемо блок-схему, що зображена на рис. 1. На початковому етапі роботи системи необхідна ініціалізація процедур апаратної та програмної діагностики. Апаратна діагностика полягає у оцінці працездатності роботи критичних пристроїв (мікроконтролера, датчиків, привода тощо) та систем зв'язку. Програмна діагностика вимагає проведення процедур перевірки працездатності основних програмних блоків (підпрограм) та системи в цілому. Це виконується шляхом застосування підпрограм діагностики.

Після проведення діагностики оператор крана повинен обрати одну з опцій: ручне чи автоматичне керування (випадок для якого будуть застосовані закони оптимального керування механізмами).

При автоматичному керуванні оператором виконується введення кінцевих координат вантажу у робочій зоні крана. На цьому етапі можна задавати ці координати наближено. Надалі система керування виконує зчитування даних про поточне положення візка на стрілі та кутове положення стріли. Це дає змогу розрахувати відстань, на яку необхідно перемістити візок і/або повернути кран.

Після цього виконується розрахунок у першому наближенні діаграм зміни швидкості візка і повороту крана. Такі діаграми приймаються трапецієподібними. Це впливає з того, що, по-перше, у подальшому їх досить просто модифікувати без зміни (або з незначною зміною) тривалості усталеного режиму руху, а по-друге, такі діаграми надзвичайно зручні для того, щоб забезпечити необхідну відстань, на яку необхідно перемістити візок і/або повернути стрілу крана.

На наступному етапі виконується зчитування даних про масу вантажу та довжину гнучкого підвісу. Ці дані необхідні для того, щоб виконати розрахунок оптимальних законів руху обох механізмів протягом їх розгону та гальмування.

Отримавши всі необхідні дані система керування виконує розрахунок діаграм зміни швидкостей протягом розгону та гальмування механізмів. При цьому застосовуються оптимальні закони керування рухом механізмами. Розрахунок всіх законів виконується у неперервній формі (у вигляді поліноміальних залежностей з коефіцієнтами з плаваючими комами). Надалі ці вирази переводяться у дискретну форму з певним кроком дискретизації за часом (як правило він відповідає мінімальному часу наростання частоти напруги живлення частотно-керованого привода).

Зазначимо, що оптимальні діаграми зміни швидкості механізмів будуть відрізнятися від лінійних. Крім того, будуть відрізнятися і тривалості перехідних режимів руху (наприклад, збільшення тривалості може бути викликане вимогою забезпечення перевантажувальної здатності привода, або вимогою неперевищення максимального струму двигуна тощо). Це вплине на шлях, який візок і/або стріла проходить протягом перехідних режимів руху. Для того, щоб врахувати цей фактор на наступному етапі алгоритму виконується уточнення діаграм швидкостей механізмів шляхом зміни тривалості усталеного режиму їх руху (окремо для кожного механізму).

Після цього видається запит на виконання керування і при позитивній відповіді (погодження виконує оператор крана) виконується керування механізмами шляхом видачі керуючих сигналів на їх частотно-керовані приводи.

Після того, як весь цикл керування було реалізовано, виконується зчитування даних з датчиків положення візка на стрілі та кутового положення стріли. У випадку, коли кінцеве положення було досягнуто система генерує новий запит на виконання нового переміщення.

Якщо запит не підтверджується оператором (що свідчить про те, що всі необхідні операції були виконані) то алгоритм керування закінчується.

У випадку коли все ж таки кінцеве положення візка чи стріли не відповідає заданому, виконується видача керуючих сигналів на привод відповідного механізму. Такі сигнали призводять до руху того чи іншого механізму на „повзучій” швидкості до заданого положення. Це дає змогу досягнути кінцевого положення із достатньою точністю.

Зазначимо, що у випадку коли один із механізмів не повинен рухатись (наприклад, необхідно виконати лише переміщення візка вздовж стріли) всі описані вище розрахунки спрощуються: вони виконуються лише для одного механізму, а узагальнена координата, яка відповідає руху нерухомого механізму, приймається константою.

Реалізація оптимального керування полягає не тільки у розробці алгоритму функціонування системи. Важливим завданням у вирішенні цього питання є правильний вибір пристроїв та апаратів, які фактично формують фізичний вплив на динамічну систему. До таких пристроїв належать: мікроконтролер, датчики (довжини гнучкого підвісу, маси вантажу, положення візка на стрілі та кутового положення стріли), а також частотний перетворювач, який виступає джерелом живлення приводних двигунів механізмів повороту крана та переміщення візка.

Всі ці пристрої працюють у специфічних умовах і тому необхідно надати рекомендації стосовно їх вибору. Використання цих рекомендацій дозволить розробити апаратну частину системи, яка б була придатною до тривалої експлуатації, надійною та забезпечувала б виконання функцій по керуванню рухом механізмами.

Крім того, необхідно вказати рекомендації щодо протоколів передачі даних, які будуть використовуватись для комунікації між вказаними пристроями.

Мікроконтролер системи керування механізмами повинен реалізувати функції [13]:

- 1) автоматизованого керування механізмами крана за командами, що надходять від органів керування крісла-пульта оператора крана;
- 2) взаємодії з підсистемою візуалізації (панелями оператора) для відображення і зміни параметрів і характеристик крана;
- 3) взаємодії з датчиками та частотними перетворювачами приводів механізмів;
- 4) обмеження команд оператора крана у випадках, коли це може призвести до виходу обладнання з ладу, завдати шкоди або суперечить правилам експлуатації, техніки безпеки;
- 5) контролю стану всіх елементів системи (частотних перетворювачів, двигунів, модулів керування, автоматичних вимикачів тощо);
- 6) гнучкої параметризації основних характеристик механізмів крана (швидкість, час розгону / гальмування тощо).

Крім того, специфіка реалізації оптимальних законів руху механізмів баштового крана вимагає підтримки у мікроконтролері математичних функцій.

Робочий цикл мікроконтролера можна описати послідовністю наступних операцій [14]: опитування входів (датчиків та каналів, які під'єднані до джойстика оператора крана), виконання програми (в ній виконується розрахунок керуючих параметрів: кутової швидкості або крутного моменту для обох двигунів механізмів), видача сигналів (через обраний протокол передачі даних), допоміжні операції. Ці операції повторюються в циклі постійно.

Серед виробників контролерів, які знайшли використання у галузі вантажопідйомної техніки, можна виділити наступні [14]: Siemens (серія Simatic [15, 16]), Schneider Electric (серія Altivar IMC [17]), ABB (серія AC500 [18]), Unitronics (серія Vision350 [19]) та інші.

Важливим питанням при виборі мікроконтролера є протокол його зв'язку з периферійними пристроями. Це питання на пряму пов'язано із використовуваними протоколами передачі даних. На даний час існують десятки стандартів передачі даних між пристроями промислових комп'ютеризованих систем [20]. У галузі вантажопідйомної техніки такими протоколами є Ethernet/IEEE 802.3 [21], CAN [22-24] та TTP [22], LAN [25], Modbus RTU [26]. На більш поширеним є протокол CAN. Зазначимо, він має певні підвиди, які широко використовуються у різних регіонах: в країнах Європи застосовують CAN Open [27], а в США – CAN Bus [28]. Оскільки більшість сучасних кранів комплектуються переважно електронікою європейських брендів, то бажано використовувати протокол CAN Open.

Для вимірювання величин довжини гнучкого підвісу вантажу, положення візка та стріли та кутового положення стріли необхідно використовувати енкодери [29]. Енкодер, який генерує сигнали про положення візка, раціонально встановлювати так, щоб він мав кінематичний зв'язок з канатним барабаном цього механізму. Теж саме відноситься до вимірювання довжини гнучкого підвісу вантажу. Енкодер механізму повороту крана раціонально встановлювати з кінематичним зв'язком з поворотною баштою або стрілою. Ці рекомендації обґрунтовані тим, що енкодер повинен давати сигнал по фактичне положення рухомого елемента, тобто наявність зазорів та люфтів у кінематичних зачепленнях не повинні вимірюватись енкодером.

Зазначимо, енкодери повинні бути відповідним чином захищені від дії навколишнього середовища (пилу, вологи, агресивних газів, сонячної радіації, електромагнітних перешкод тощо). При виборі енкодерів особливу увагу необхідно приділити ступеню їх захищеності IP.

Точність енкодерів повинна визначатись з врахуванням наступної нерівності:

$$\Delta_{доп.л} \geq \frac{\pi D}{N}, \quad (1)$$

де $\Delta_{доп.л}$ – допустима похибка визначення лінійного параметру (положення візка або довжини гнучкого підвісу вантажу), м; D – діаметр канатного барабана, м; N – точність енкодера, імп/об. Можна записати аналогічну до (1) формулу для визначення допустимої похибки визначення кутового положення стріли:

$$\Delta_{доп.к} \geq \frac{360}{N}, \quad (2)$$

де $\Delta_{доп.к}$ – допустима похибка визначення кутового параметру (положення стріли), град. Неправильне визначення точності енкодера, без врахування виразів (1) та (2), може призвести до перевантаження мікропроцесора даними, а недостатня його точність веде до неякісного позиціонування стріли та візка, що збільшує тривалість операцій по „доводці” цих механізмів.

Датчик маси вантажу – це тензометр S-подібного типу, або типу „балка”. Перший тип тензометра доцільно закріплювати у місцях, де встановлюються обмежувачі вантажопідйомності (наприклад, у стріловому розчалі на оголовку стріли [30]). Другий тип бажано встановлювати у місці закріплення нерухомого кінця каната до металоконструкції крана. Незалежно

від місця встановлення тензодатчика повинні бути таровані. Крім того, захищеність тензометричного датчика (IP) повинна відповідати умовам його експлуатації.

Якісна реалізація оптимального керування пов'язана із застосуванням частотних перетворювачів з векторним керуванням [31, 32], або з скалярним керуванням, які охоплені зворотним зв'язком по положенню і швидкості двигуна [33]. Зазначимо, для вантажопідйомних машин, які значну долю циклу переміщення вантажу працюють у перехідних режимах, раціонально застосовувати саме векторне керування електромагнітним моментом. Це викликано тим, що скалярний метод керування (для вантажопідйомних машин він полягає у тому, що амплітуда напруги живлення двигунів змінюється пропорційно до частоти), не забезпечує енергоефективність роботи двигунів.

Крім того, при виборі частотного перетворювача доцільно розглянути можливість (функцію) рекуперативного гальмування [34-36]. При цьому необхідно враховувати: 1) середню кількість пусків і зупинок механізму за годину; 2) інерційні характеристики механізму. Якщо зведений до вала двигуна момент інерції механізму є доволі великим і кількість пусків і гальмувань механізмів значна, то застосування рекупераційного блоку є доцільним. Для остаточної оцінки доцільності необхідно проводити порівняльні розрахунки енерговитрат при роботі механізму для обох варіантів: із рекупераційним блоком і без нього. Для першого випадку необхідно враховувати вартість рекупераційного блоку, а також фактор того, що якість рекуперованої електроенергії, як правило, є невисокою (у випадку рекуперації енергії у інших частотний перетворювач цим фактором можна знехтувати через те, що вхідний блок перетворювача являє собою трифазний мостовий випрямляч).

Обов'язковими функціями частотних перетворювачів двигунів механізмів повороту крана та зміни вильоту вантажу є наступні:

- 1) можливість моніторингу навантаження приводів механізмів;
- 2) наявність захисних функцій (заклинювання, перевантаження, коротке замикання, обрив фази, регульовані часострумові характеристики тощо);
- 3) діагностика електрообладнання та самодіагностика;
- 4) можливість взаємодії із мікропроцесорною системою керування за схемою „ведучий - ведений”;
- 5) різноманітність налаштовуваних параметрів (частота несучої ШІМ, початкова частота, початкова напруга живлення, тривалість наростання та спадання частоти напруги живлення тощо);
- 6) можливість створення високого пускового крутного моменту;
- 7) достатня кількість релейних (для підключення гальм) виходів та цифрових і аналогових (дублюючих) керуючих входів;
- 8) можливість реалізації різних типів гальмування (рекуперативне, електродинамічне, керуванням механічними гальмами, на вибігу).

Ці функції повинні бути налаштовані так, щоб взаємодія частотного перетворювача з мікроконтролером по каналу керування та частотного перетворювача з електродвигуном і гальмами по електросиловим каналам давала можливість надійної і якісної реалізації оптимального керування рухом обох механізмів.

Виробники частотних перетворювачів, намагаючись задовольнити специфіку задач керування приводами механізмів вантажопідйомних машин, як правило, виділяють їх у окрему лінійку. Серед найпоширеніших у цій галузі є такі частотні перетворювачі: Schneider Electric (лінійки Altivar Process ATV900, Altivar Machine ATV340 та ATV320 [37]), Siemens

(лінійки MICROMASTER 440, SINAMICS V20, SINAMICS S120 [38]), Mitsubishi Electric (лінійка FR-A [39]), Danfoss (лінійка VLT Drives [40]), ABB (лінійка ACS880 [41]) та інші.

Висновки

1. Розроблено структурно-функціональну схему системи оптимального керування механізмами переміщення візка та повороту крана. Вона дозволяє реалізувати оптимальні закони руху механізмів, що усувають маятникові коливання вантажу на гнучкому підвісі. Описано алгоритм роботи системи, який полягає у діагностиці обладнання і програмної частини систем, визначенні заданого та кінцевого положень вантажу, розрахунку та уточнення законів руху механізмів, реалізації керування та корекції положення вантажу (за необхідності) шляхом видачі на приводи механізмів серії коригуючі сигнали.

2. Обґрунтовано рекомендації стосовно вибору апаратної частини системи оптимального керування (мікроконтролер, датчики довжини гнучкого підвісу, маси вантажу, положення візка на стрілі та кутового положення стріли), а також частотного перетворювача. Крім того, наведено загальні рекомендації стосовно вибору протоколу передачі даних між елементами системи.

Список використаних джерел

1. An Antiswing Trajectory Planning Method With State Constraints for 4-DOF Tower Cranes: Design and Experiments / Zhuoqing Liu, Tong Yang, Ning Sun, Yongchun Fang // IEEE Access, 2019. – Vol. 7. – P. 62142-62151. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2915999
2. Real-time Nonlinear Model Predictive Path-Following Control of a Laboratory Tower Crane / Martin Böck, Andreas Kugi // IEEE Transactions on control system technology, 2016. – Vol. 22, №4. – P. 1461-1473.
3. Макаревич Е. В. Разработка оптимального управления движениями башенного крана / Е. В. Макаревич, В. Н. Шамардина, Ф. Палис, С. Палис // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 170-171.
4. Палис С. Система демпфирования колебаний для подъемных кранов вращения [Электронный ресурс] / Стефан Палис, Франк Палис, Марио Лехнерт ; пер. с англ. Зюзин Д. Г. – Режим доступа : <http://masters.donntu.org/2009/eltf/zyuzin/library/translate.htm>. (дата обращения 25.02.2020) – Название с экрана.
5. A real-time optimal control method for swing-free tower crane motions / W. Devesse, M. Ramteen, L. Feng, J. Wikander // 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Madison, WI, 2013. – P. 336-341
6. Корн Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.
7. Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещёв. – Одесса : СМІЛ, 2008. – 192 с.
8. Research Into Payload Swaying Reduction Through Cable Length Manipulation During Boom Crane Motion / Alexander A. Kostikov, Alexander V. Perig, Oleksii V. Larichkin, Alexander N. Stadnik, Eduard P. Gribkov // FME Transactions, 2019 – № 47. – P. 464-476. DOI: 10.5937/fmet1903464K.
9. Тепляков А. Г. Реализация оптимального управления частотным электроприводом механизма поворота / А. Г. Тепляков // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2004. – Вип. 62. – С. 36-39.
10. Герасимьяк Р. П. Оптимальное управление крановым механизмом передвижения / Р. П. Герасимьяк, Л. В. Мельникова // Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси і системи. – 1999. – № 1. – С. 87-94.
11. Carmona I. G. Control of a two wired hammerhead tower crane / I. G. Carmona, J. Collado // Nonlinear Dynamics. – 2016. – № 84. – P. 2137-2148. DOI: 10.1007/s11071-016-2634-3.
12. Golafshani A. L. Modeling and Optimal Control of Tower Crane Motions : A thesis of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering / A. L. Golafshani. – 1999. – 133 p. – URL : https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk1/tape7/PQDD_0003/NQ44760.pdf (23.03.2020).

13. Функции программируемого логического контроллера и панели оператора на кранах [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://kzk.kiev.ua/chastotnye-kranovye-sistemy-i-programmiruyemye-logicheskie-kontrollery> (дата обращения 23.03.2020). – Название с экрана.
14. Мишин А. В. Программирование контроллеров грузоподъемных машин : метод. указания / А. В. Мишин, П. А. Сорокин. – М. : МГУПС (МИИТ), 2015. – 42 с.
15. Автоматизированные системы управления грузоподъемными кранами [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.electrolibrary.info/loadlifting/100-avtomatizirovannye-sistemy-upravleniya-gruzopodemnymi-kranami.html> (дата обращения 23.03.2020). – Название с экрана.
16. Система управления мостовым краном КМТМ30-10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.asep.kz/projects-solutions/kran-system/azf-kazhrom-kran-kmtrm30-10/> (дата обращения 23.03.2020). – Название с экрана.
17. Внедрение современной автоматизированной системы управления краном на базе платформы MachineStruxure от Schneider Electric при реконструкции крана мостового г/п 30/5т [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.prom-resource.spb.ru/page/machinestruxure-on-bz> (дата обращения 23.03.2020). – Название с экрана.
18. Safety PLC ensures safe crane operation [Electronic resource] – URL : <https://www.designworldonline.com/safety-plc-ensures-safe-crane-operation/> (23.03.2020). – The title from the screen.
19. Need a system for both control and monitoring? an All-in-One PLC+HMI offers a single solution for both problems [Electronic resource]. – URL : <https://unitronicsplc.com/testimonials/kone-cranes/> (23.03.2020) – The title from the screen.
20. List of automation protocols [Electronic resource]. – URL : https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_automation_protocols (23.03.2020). – The title from the screen.
21. CRANE CONTROL NETWORK / Alojz Slutej, Fetah Kolonic, Alen Poljungan [Electronic resource] – URL : http://bib.irb.hr/datoteka/204929.E05-37_F_Slutej.pdf (23.03.2020). – The title from the screen.
22. Performance evaluation of network protocol for automated transfer crane system / Kyoung-Nam Ha, Man-Ho Kim, Kyung Chang Lee, Suk Lee // Journal of Control, Automation, and Systems Engineering. – 2005 – Vol. 11, № 8. – P. 709–716.
23. Cranes go digital [Electronic resource]. – URL : <http://www.cranestodaymagazine.com/features/cranes-go-digital/> (23.03.2020). – The title from the screen.
24. The wireless monitoring system of tower cranes based on MCP2515/CAN bus / Yaping Tang, Haibo Wu, Hailong Liu // Proceedings of the 2015 International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering. Series: Advances in Intelligent Systems Research. – 2015. – P. 1635-1639. DOI: 10.2991/isrme-15.2015.332
25. Crane Control and Automation. Global Solutions. TMEIC. I-1105-A. Revised March 2015. – P. 32
26. Crane Weight Indicator / Force Measuring Controller Modbus RTU Communication Protocol [Electronic resource]. – URL : <http://www.weighingindicatorcontroller.com/sale-10938144-crane-weight-indicator-force-measuring-controller-modbus-rtu-communication-protocol.html> (23.03.2020). – The title from the screen.
27. CAN Open [Electronic resource]. – URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/CANOpen> (23.03.2020). – The title from the screen.
28. CAN Bus [Electronic resource] – URL : https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus (23.03.2020). – The title from the screen.
29. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков : по материалам семинара „Practical design techniques for sensor signal conditioning”. [автор перевода Горшков Б. Л.] / Analog Devices, AUTEX Ltd. – С.-Пб. : АВТЭКС, 2005. – 311 с.
30. Невзоров Л. А. Башенные краны / Л. А. Невзоров, Г. Н. Пазельский, В. А. Романова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1980. – 326 с.
31. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen / F. Blaschke // Siemens Zeitschrift, 1971. – Bd. 45, H. 10. – P. 757-760.
32. Depenbrock M. Direct self control (DSC) of inverter-fed induction machines / M. Depenbrock // IEEE Trans. Power Electron. – 1985. – Vol. 3, № 3. – P. 420–429.
33. Бозе Б. К. Современная силовая электроника и преобразователи переменного тока / Б. К. Бозе // Prentice Hall PTR, 2002. – 738 с.
34. Ромасевич Ю. О. Динамічна оптимізація режимів руху механізмів вантажопідйомних машин як мехатронних систем : дис. д-ра техн. наук: 05.05.05 / Ромасевич Юрій Олександрович. – Одеса, 2015. – 519 с.

35. Котеленко С. В. Повышение эффективности функционирования системы рекуперации электрической энергии в многодвигательных подъемно-транспортных механизмах : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Котеленко Светлана Владимировна – Тула, 2014. – 109 с.
36. Проектирование электроприводов крановых механизмов. Техническая коллекция Schneider Electric. Вып. 12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://profsector.com/media/catalogs/566dcd7cb36cc.pdf> (23.03.2020). – Название с экрана.
37. Преобразователи частоты ALTIVAR для грузоподъемных кранов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ua.automation.com/content/frequency-altivar-modulator> (23.03.2020) – Название с экрана.
38. Преобразователи частоты SIEMENS [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.tekhar.com/Programma/Siemens/Privod_tech/Preobrazovateli/AC_drive/index_AC.htm (23.03.2020) – Название с экрана.
39. Преобразователи частоты Mitsubishi Electric FR-A760 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://rusautomation.ru/privodnaya-tehnika/mitsubishi-fr-a760> (23.03.2020). – Название с экрана.
40. Преобразователи частоты для электроприводов грузоподъемных кранов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://drives.ru/upload/page_id_1097/kranovabrosura.pdf (23.03.2020). – Название с экрана.
41. Smooth tower crane operation with ACS880 drives [Electronic recourse]. – URL : <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000220703&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch> (23.03.2020) – Title from the screen.

References

1. Zhuoqing Liu, Tong Yang, Ning Sun & Yongchun Fang 2019, 'An Antiswing Trajectory Planning Method With State Constraints for 4-DOF Tower Cranes: Design and Experiments', *IEEE Access*, vol. 7, pp. 62142-62151.
2. Böck, M & Kugi, A 2016, 'Real-time Nonlinear Model Predictive Path-Following Control of a Laboratory Tower Crane', *IEEE Transactions on control system technology*, vol. 22, no. 4, pp. 1461-1473.
3. Makarevych, EV, Shamardyna, VN, Palys, F & Palys, S 2011, 'Razrobotka optymalnoho upravleniya dvyzheniyamy bashennoho kрана', *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy*, no. 3, pp. 170-171.
4. Palys, S, Palys, F & Lekhnert, M 2009, *Systema dempfyrovanyia kolebanyi dlia podemnykh kранov vrashcheniya*, viewed 25 February 2020, <<http://masters.donntu.org/2009/eltf/zyuzin/library/translate.htm>>.
5. Devesse, W, Ramteen, M, Feng, L & Wikander, J 2013, 'A real-time optimal control method for swing-free tower crane motions', *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Madison, pp. 336-341
6. Korn, HA & Korn, TM 1973, *Spravochnyk po matematyke dlia nauchnykh robotnykov y ynzhenyrov*, Nauka, 1973.
7. Herasymyak, RP & Leshchov, VA 2008, *Analyz y syntez kранovykh elektromekhanicheskyykh system*, SMYL, 2008.
8. Kostikov, AA, Perig, AV, Larichkin, OV, Stadnik, AN & Gribkov, EP 2019, 'Research Into Payload Swaying Reduction Through Cable Length Manipulation During Boom Crane Motion', *FME Transactions*, no. 47, pp. 464-476.
9. Tepliakov, AH 2004, 'Realyzatsiya optymalnoho upravleniya chastotnym elektropriyodom mekhanizma povorota', *Elektromashynobuduvannia ta elektroobladnannia*, iss. 62, pp. 36-39.
10. Herasymyak, RP & Melnykova, LV 1999, 'Optymalnoe upravlynye kранovym mekhanizmom peredvyzheniya', *Avtomatika. Avtomatyzatsiya. Elektrotekhnicheskyye komplekсы y systemy*, no. 1, pp. 87-94.
11. Carmona, IG & Collado, J 2016, 'Control of a two wired hammerhead tower crane', *Nonlinear Dynamics*, no. 84, pp. 2137-2148.
12. Galafshani, AL 1999, 'Modeling and Optimal Control of Tower Crane Motions', *Doct.pfilos.n. thesis*.
13. Funktsyy prohrammyruemoho lohycheskoho kontrollera y panely operatora na kранakh n.d., viewed 23 March 2020, <<https://kzk.kiev.ua/chastotnye-kранovye-sistemy-i-programmiruyemye-logicheskie-kontrollery>>.
14. Myshyn, AB & Sorokyn, PA 2015, *Prohrammyrovanye kontrollerov hruzopodemnykh mashyn*, Moskovskij gosudarstvennyj universitet putej soobshheniya, Moskva.
15. Avtomatyzirovannyye systemy upravleniya hruzopodemnyimi kранami n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.electrolibrary.info/loadlifting/100-avtomatizirovannyye-sistemy-upravleniya-gruzopodemnymi-kранami.htm>>.
16. Systema upravleniya mostovym kраном KMTPM30-10 n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.asep.kz/projects-solutions/kран-system/azf-kazhrom-kран-kmtrm30-10/>>.

17. Vnedrenye sovremennoi avtomatyzyrovannoi systemy upravleniya kranom na baze platformy MachineStruxure ot Schneider Electric pry rekonstruksyy krana mostovoho h/p 30/5t n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.prom-resource.spb.ru/page/machinestruxure-on-b>>.
18. Safety PLC ensures safe crane operation n.d., viewed 23 March 2020, <<https://www.designworldonline.com/safety-plc-ensures-safe-crane-operation/>>.
19. Need a system for both control and monitoring? an All-in-One PLC+HMI offers a single solution for both problems n.d., viewed 23 March 2020, <<https://unitronicsplc.com/testimonials/kone-cranes/>>.
20. List of automation protocols n.d., viewed 23 March 2020, <https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_automation_protocols>.
21. CRANE CONTROL NETWORK by Alojz Slutej, Fetah Kolonic, Alen Poljugan n.d., viewed 23 March 2020, <http://bib.irb.hr/datoteka/204929.E05-37_F_Slutej.pdf>.
22. Kyoung-Nam Ha, Man-Ho Kim, Kyung Chang Lee & Suk Lee 2005, 'Performance evaluation of network protocol for automated transfer crane system', *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering*, vol. 11, no. 8, pp. 709-716.
23. Cranes go digital n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.cranestodaymagazine.com/features/cranes-go-digital/>>.
24. Yaping Tang, Haibo Wu & Hailong Liu 2015, 'The wireless monitoring system of tower cranes based on MCP2515/CAN bus', *International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering. Series: Advances in Intelligent Systems Research*, pp. 1635-1639.
25. *Crane Control and Automation. Global Solutions. TMEIC. I-1105-A. Revised March 2015*, pp. 32.
26. Crane Weight Indicator. Force Measuring Controller Modbus RTU Communication Protocol n.d., viewed 23 March 2020, <<http://www.weighingindicatorcontroller.com/sale-10938144-crane-weight-indicator-force-measuring-controller-modbus-rtu-communication-protocol.html>>.
27. CAN Open n.d., viewed 23 March 2020, <<https://en.wikipedia.org/wiki/CANopen>>.
28. CAN Bus n.d., viewed 23 March 2020, <https://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus>.
29. *Metody praktycheskoho konstruyrovaniya pry normyrovanny syhnalov s datchikov: po materyalam semynara „Practical design techniques for sensor signal conditioning”* 2005, Analog Devices, AUTEX Ltd.
30. Nevzorov, LA, Pazelskyi, HN & Romanova, VA 1980, *Bashennye krany*, 4th edn, Vysshaya shkola, Moskva.
31. Blaschke, F 1971, 'Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen', *Siemens Zeitschrift*, vol. 45, no. 10, pp. 757-760.
32. Depenbrock, M 1985, 'Direct self control (DSC) of inverter-fed induction machines', *IEEE Trans. Power Electron*, no. 3, vol. 3, pp. 420-429.
33. Boze, BK 2002, *Sovremennaya sylovaia elektronika y preobrazovately peremennogo toka*, Prentice Hall PTR.
34. Romasevych, YuO 2015, 'Dynamichna optymizatsiya rezhymiv rukhu mekhanizmiv vantazhopidomnykh mashyn yak mekhatronnykh system', Doct.tekh.n. thesis, Odesa.
35. Kotelenko, SV 2014, 'Povysheniye effektivnosti funktsionirovaniya systemy rekuperatsyy elektrycheskoi enerhiy v mnohodvyhatelnykh podemno-transportnykh mekhanizmach', Doct.tekh.n. thesis, Tula.
36. *Proektyrovaniye elektropriyvodov kranovykh mekhanizmov. Tekhnicheskaya kolleksiya Schneider Electric* 2009, iss. 12, viewed 23 March 2020, <<https://profsector.com/media/catalogs/566dcd7cb36cc.pdf>>.
37. Preobrazovately chastoty ALTIVAR dlia hruzopodemnykh kranov n.d., viewed 23 March 2020, <<http://ua.automation.com/content/frequency-altivar-modulator>>.
38. Preobrazovately chastoty SIEMENS n.d., viewed 23 March 2020, <http://www.tekhar.com/Programma/Siemens/Privod_tech/Preobrazovateli/AC_drive/index_AC.htm>.
39. Preobrazovately chastoty Mitsubishi Electric FR-A760 n.d., viewed 23 March 2020, <<https://rusautomation.ru/privodnaya-tehnika/mitsubishi-fr-a760>>.
40. Preobrazovately chastoty dlia elektropriyvodov hruzopodemnykh kranov n.d., viewed 23 March 2020, <https://drives.ru/upload/page_id_1097/kranovabrosura.pdf>.
41. Smooth tower crane operation with ACS880 drives n.d., viewed 23 March 2020, <<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000220703&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch>>.

Стаття надійшла до редакції 30 червня 2020 р.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОПРИСКОРЕНЬ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ НАПРЯМІ НА МОДЕРНІЗОВАНИХ ХОДОВИХ КОЛЕСАХ ВАНТАЖНОГО ВІЗКА МОСТОВОГО КРАНА

Фідровська Н.М.¹, Слепужніков Є.Д.²

Харківський національний автомобільно-дорожній університет¹

Національний університет цивільного захисту України²

Інформація про авторів:

Фідровська Наталія Миколаївна: ORCID: 0000-0002-5248-273X; nfidrovskaya@ukr.net; доктор технічних наук; професор кафедри дорожніх і будівельних машин; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна

Слепужніков Євген Дмитрович: ORCID: 0000-0002-5449-3512 slepuzhnikov@nuczu.edu.ua, кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціальної хімії та хімічної технології; Національний університет цивільного захисту України, вул. Чернишевська, 94, м. Харків, 61023, Україна

В статті розглянуто експериментальні дослідження віброприскорень, які виникають в осі ходових коліс, при пересуванні вантажного візка мостового крана. Кранові колеса найбільш швидко зношуваний елемент крана. Зменшення їхньої роботи приводе до збільшення ремонтних витрат. Тому, підвищення довговічності кранових ходових коліс за рахунок їхньої модернізації, являється досить актуальною задачею для сучасного кранобудування. Всі конструкції кранових ходових коліс досить жорсткі і не сприймають поштовхи і перекося виникаючі при відхиленні рейкового шляху від рекомендованих значень та приводять до значного зносу реборд і рейок.

Для порівняння були вибрані двохребордні суцільні ходові колеса з циліндричним ободом. Такі колеса застосовуються практично на всіх мостових кранах. Також для експериментального дослідження були виготовлені колеса модернізованої конструкції. Модернізовані колеса складаються з трьох шарів і мають еластичну гумову вставку, яка виготовлена із резини технічної суміші.

Для перевірки теоретичних даних, які були отримані раніше, був проведений експеримент на мостовому крані вантажопідйомністю 5 т., прогоном 22,5 м., висотою підйому 8 м., режимом роботи 7 К. Дослідження вібраційного стану проводилось на осі веденого штатного ходового колеса вантажного візка мостового крана та на осі веденого модернізованого ходового колеса вантажного візка мостового крана.

Аналіз рішень, які були отримані показав, що при застосуванні модернізованого ходового колеса з еластичною гумовою вставкою динамічні фактори при пересуванні вантажного візка мостового крана зменшуються. Проведено аналіз закономірності формування вібраційних ознак під час руху вантажного візка мостового крана на різних швидкостях, а також на різних його робочих режимах.

Запропонована модернізована конструкція ходового колеса з еластичною гумовою вставкою дозволяє підвищити його експлуатаційну надійність та зменшити формування віброприскорень у вертикальному напрямі.

Ключові слова: колесо ходове, віброприскорення, вантажний візок, гумова вставка, мостовий кран.

Фидровская Н.Н., Слепужников Е.Д. „Экспериментальные исследования виброускорений в вертикальном направлении на модернизированных ходовых колесах грузовой тележки мостового крана“.

В статье рассмотрены экспериментальные исследования виброускорений, которые возникают в оси ходовых колес, при передвижении грузовой тележки мостового крана. Крановые колеса наиболее быстро изнашиваемый элемент крана. Уменьшение их работы приводит к увеличению ремонтных затрат. Поэтому, повышение долговечности крановых ходовых колес за счет их модернизации, является весьма актуальной задачей для современного краностроения. Все конструкции крановых ходовых колес достаточно жесткие и не воспринимают толчки и перекосы возникающие при отклонении рельсового пути от рекомендуемых значений, что приводит к значительному износу реборд и рельсов.

Для сравнения были выбраны сплошные двухребордные ходовые колеса с цилиндрическим ободом. Такие колеса применяются практически на всех мостовых кранах. Также для экспериментального исследования были изготовлены колеса модернизированной конструкции. Модернизированные колеса состоят из трех слоев и имеют эластичную резиновую вставку, которая изготовлена из резинотехнической смеси.

Для проверки теоретических данных, которые были получены ранее, был проведен эксперимент на мостовом кране грузоподъемностью 5 т., пролетом 22,5 м., высотой подъема 8 м., режимом работы 7 К. Исследования вибрационного состояния проводилось на оси ведомого штатного ходового колеса грузовой тележки мостового крана и на оси ведомого модернизированного ходового колеса грузовой тележки мостового крана.

Анализ решений, которые были получены показал, что при применении модернизированного ходового колеса с эластичной резиновой вставкой динамические факторы при передвижении грузовой тележки мостового крана уменьшаются. Проведен анализ закономерности формирования вибрационных признаков во время движения грузовой тележки мостового крана на различных скоростях, а также на различных его рабочих режимах.

Предложенная модернизированная конструкция ходового колеса с эластичной резиновой вставкой позволяет повысить его эксплуатационную надежность и уменьшить формирование виброускорений в вертикальном направлении.

Ключевые слова: колесо ходовое, виброускорение, грузовая тележка, резиновая вставка, мостовой кран.

Fidrovsk N., Slepugnikov E. "Experimental studies on vibration acceleration in the vertical direction on the modernized traveling wheels of the bridge crane truck".

The article discusses experimental studies of vibration accelerations that occur in the axle of the traveling wheels, when moving the cargo carriage of an overhead crane. Crane wheels are the first crane elements to wear out. A decrease in their work leads to an increase in repair costs. Therefore, increasing the durability of crane traveling wheels due to their modernization is a very urgent task for modern crane construction. All designs of crane traveling wheels are quite rigid and do not perceive shocks and distortions that occur when the rail track deviates from the recommended values, which leads to significant wear of the flanges and rails.

For comparison, solid double-ribbed running wheels with a cylindrical rim were selected. These wheels are used in almost all overhead traveling cranes. Also, wheels of a modernized design

were manufactured for experimental research. The upgraded wheels consist of three layers and have an elastic rubber insert made of a rubber compound.

To check the theoretical data that were obtained earlier, an experiment was carried out on an overhead crane with a lifting capacity of 5 tons, a span of 22.5 m., a lifting height of 8 m., an operating mode of 7K. bridge crane trolleys and on the axis of the driven modernized running wheel of the bridge crane cargo trolley.

The analysis of the solutions that were obtained showed that when using a modernized traveling wheel with an elastic rubber insert, the dynamic factors when moving the cargo carriage of an overhead crane decrease. The analysis of the regularity of the formation of vibration signs during the movement of the cargo carriage of an overhead crane at various speeds, as well as in its various operating modes is carried out.

The proposed modernized design of a running wheel with an elastic rubber insert makes it possible to increase its operational reliability and reduce the formation of vibration accelerations in the vertical direction.

Keywords: traveling wheel, vibration acceleration, cargo trolley, rubber insert, bridge crane.

Вступ

Мостові крани являються найбільш застосовуваними вантажопідійомними машинами в умовах сучасного виробництва, тому забезпечення їх надійної і безперебійної роботи являється досить актуальною задачею [1, 2].

Довговічність роботи мостового крана залежить в більшій мірі від довговічності його металоконструкції, яка сприймає досить значні змінні навантаження [3, 4]. Циклічна робота вантажопідійомного крана викликає швидкозмінні процеси навантажень не тільки в часі, але і з величини [5]. Це потребує досить уважного визначення всіх силових факторів, які мають місце при роботі мостового крана, як статичних так і динамічних [6].

Основні навантаження, які виникають в металоконструкції мостового крана, виникають при підйомі вантажу і роботі механізмів пересування вантажного візка і мосту [7, 8]. Оцінці впливу конструктивних параметрів механізмів пересування на динамічні навантаження в металоконструкції присвячено багато робіт [9, 10]. Нами була запропонована нова конструкція ходового кранового колеса з пружною вставкою [11, 12], що дозволило значно зменшити динамічні навантаження при роботі механізму пересування [13].

Постановка проблеми

Динамічні моделі мостового крану розглянуто в роботі [14]. Автори визначали лінійні коливання моделі, яка дає опис вібрації вантажу і тролей під час руху крану і оцінили сили тертя в системі. Була дана оцінка впливу змінності навантаження на протязі дії сил опору при пересуванні крану. Але в роботі не розглянуто динамічні навантаження в металоконструкції крану при пересуванні.

Можливість модернізувати механізм пересування вантажного візка мостового крана шляхом заміни трьохступінчастого вертикального циліндричного редуктора на двохступінчастий і окремо винесену зубчасту передачу розглянута в роботі [15]. Ходове колесо при цьому безпосередньо встановлено на валу колісної пари візка. Автори стверджують, що така структурна схема зменшить втрати енергії і підвищить надійність. Але при цьому не було досліджено, на скільки зменшаються динамічні навантаження.

Результати експериментальних досліджень появи бокових сил в мостовому крані, які змінюються в процесі руху наведені в роботі [16]. Було встановлено, що експериментальні значення бокових сил менші, ніж визначені теоретично. Було б доцільним розглянути колеса не тільки з циліндричним профілем, але і з конічним, що забезпечить менші бокові сили.

Оптимальний хімічний склад сталі і технологію технічної обробки для ходових коліс шахтних вагонеток запропоновано в роботі [17]. Автори запевняють що це має підвищити зносостійкість коліс, але зменшення динамічних зусиль не розглядається. Було б доцільним провести теоретичні дослідження, які б дозволили більш суттєво оцінювати зносостійкість коліс.

Це дає підстави стверджувати, що проведення дослідження щодо підвищення експлуатаційної надійності та довговічності ходового колеса за рахунок використання еластичних вставок є доцільним.

Метою дослідження є обґрунтування доцільності модернізації конструкції ходового колеса на основі вібраційних ознак виникаючих в ходовому колесі.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести експериментальне дослідження формування віброприскорень у вертикальному напрямі в колесах штатної конструкції;
- провести експериментальне дослідження формування віброприскорень у вертикальному напрямі в колесах модернізованої конструкції.

Матеріали і методи досліджень

Для вимірювання віброприскорень, що виникають підчас проведення натурних випробувань візка мостового крану використовувався комплекс «Ультра-В-І» (рис. 1).

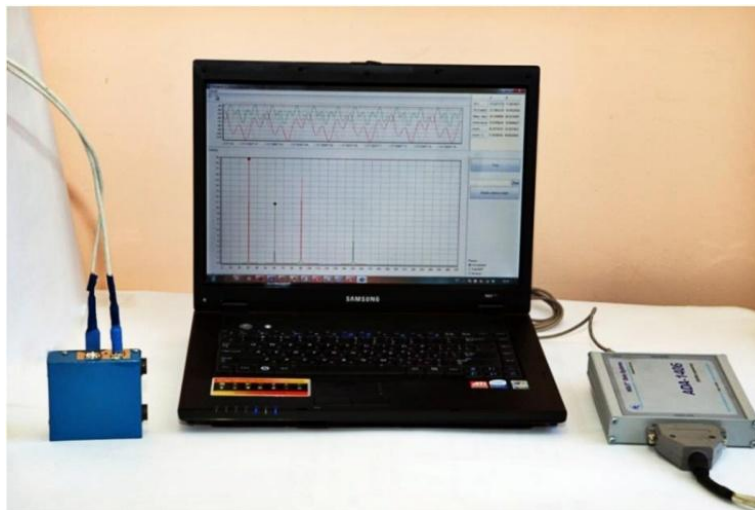


Рис. 1. Загальний вигляд вібровимірювального комплексу «Ультра-В-І»

Програмне забезпечення, що входить до складу вібровимірювального комплексу дозволяє в реальному часі будувати залежності віброприскорень від частоти, а також визначати спектральний склад сигналу. Загальні характеристики комплексу зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Загальні характеристики вимірювального комплексу

Параметр	Значення
Тип сенсора	ADXL250
Принцип вимірювання	Ємнісний
Кількість осей вимірювання	2/3
Робочий діапазон амплітуд, м/с ²	0,2-40
Робочий діапазон частот, Гц	0,1-400
Нелінійність по амплітуді, %	1
Нерівномірність частотної характеристики, %	2
Робочий діапазон температур, оС	0-50
Кількість розрядів АЦП	14
Час автономної роботи, год	2

Дослідження проводились на діючому мостовому крані. Вібровимірювальний комплекс розташовувався безпосередньо на об'єкті досліджень. Датчики було встановлено в контрольних точках вантажного візка крану та за допомогою розміщених на балці крану дротів з'єднувались із аналого-цифровим перетворювачем. Останнє дозволяло здійснювати безпосередній контроль над режимами роботи крану.

Дослідження вібраційного стану проводилось на осі веденого штатного ходового колеса вантажного візка мостового крану (рис. 2, а) та на осі веденого модернізованого ходового колеса вантажного візка мостового крану (рис. 2, б).



а



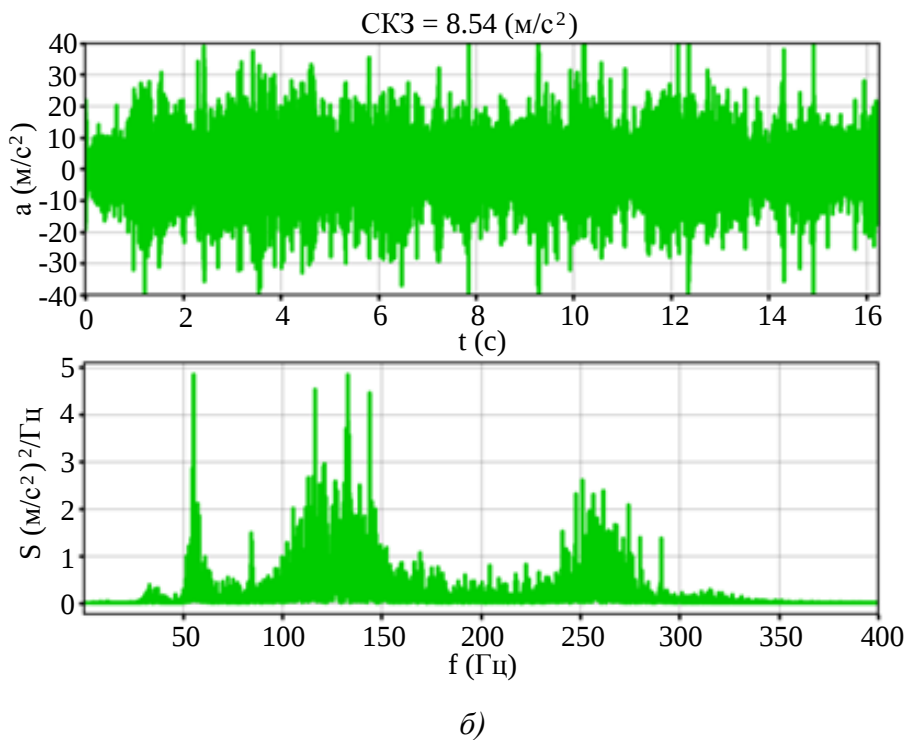
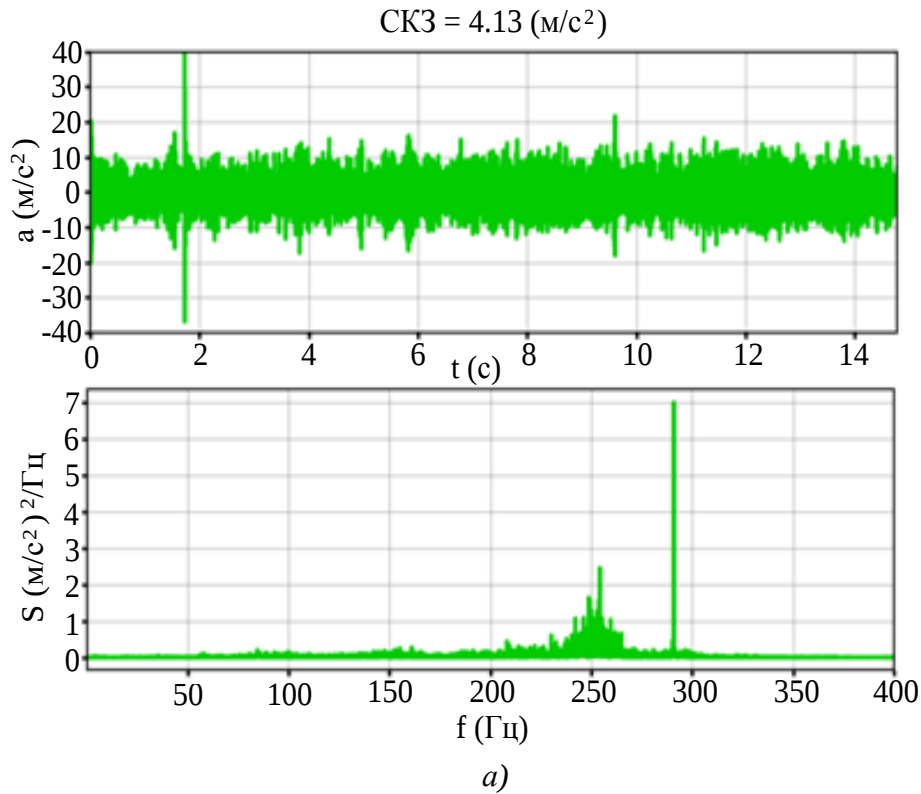
б

Рис. 2. Розміщення датчиків прискорень на осі коліс вантажного візка
а – штатне ходове колесо; б – модернізоване ходове колесо

Вимірювання вібрацій проводилось на різних швидкостях руху візка по мосту крану, а також на різних його робочих режимах.

Результати дослідження

За підсумками експериментальних досліджень зробимо узагальнення результатів віброприскорень у вертикальному напрямі на модернізованому (з еластичною, гумовою вставкою) та штатному ведених колесах (рис. 3–5).



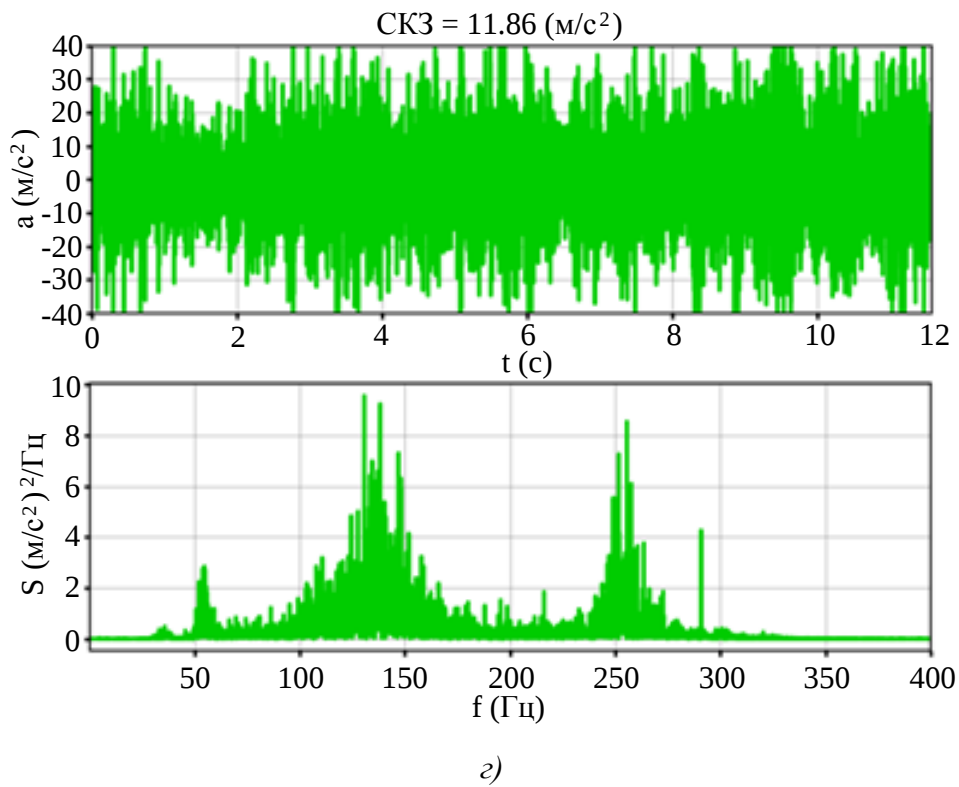
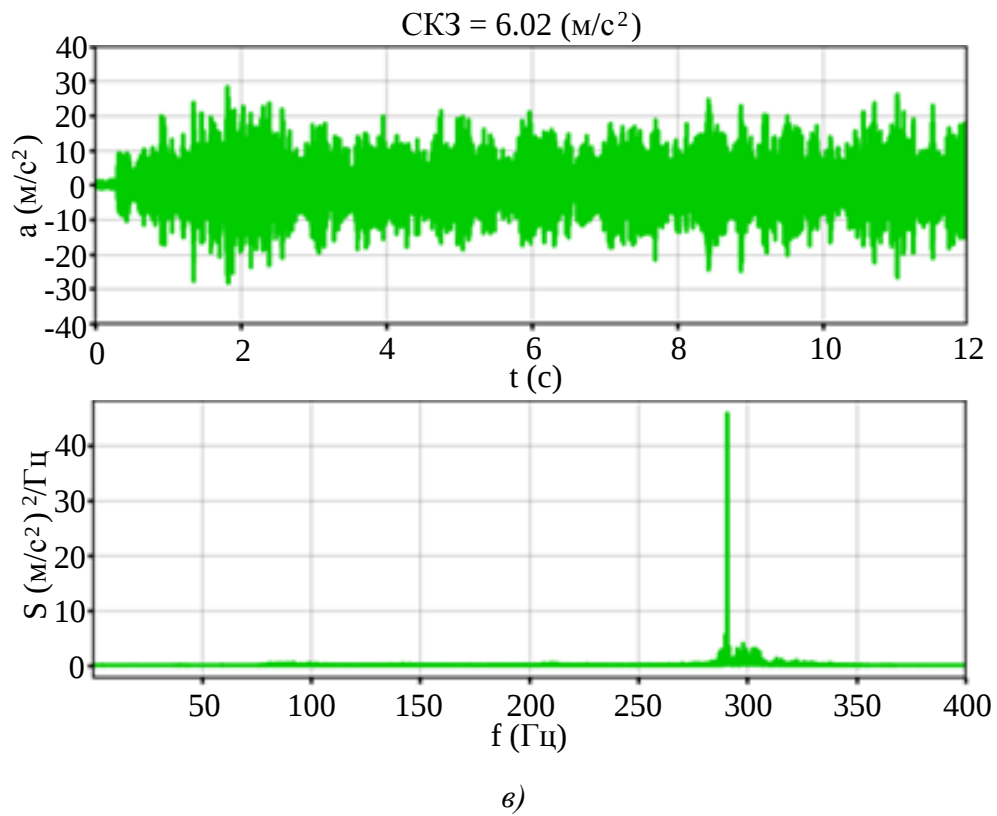
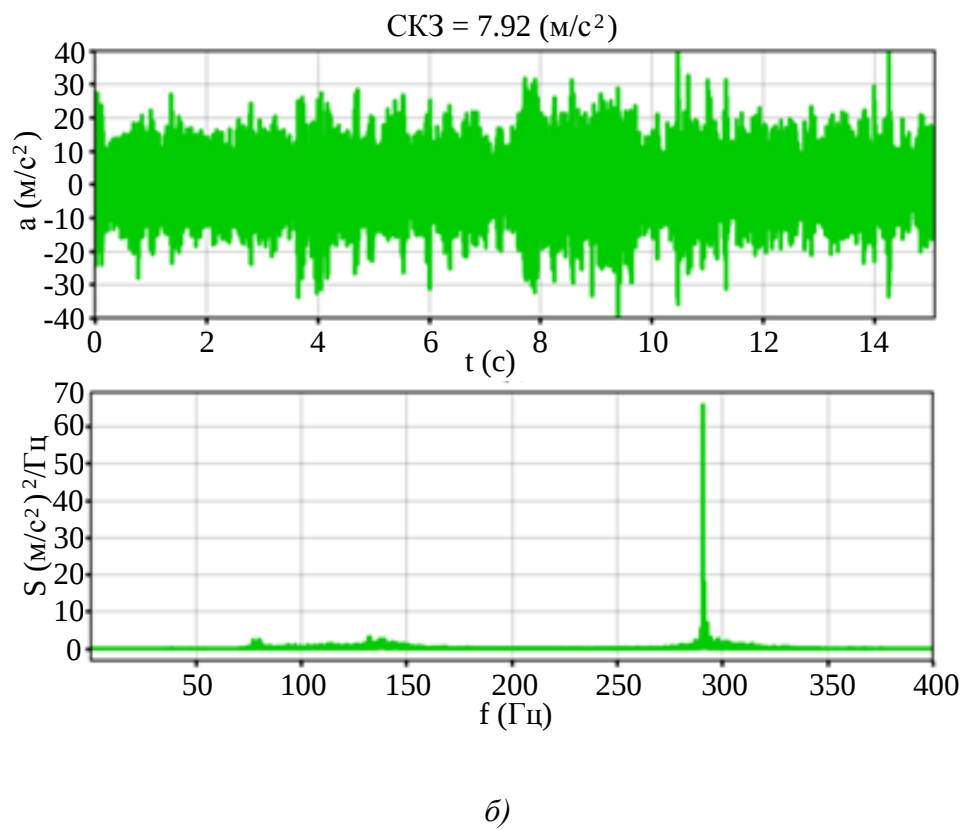
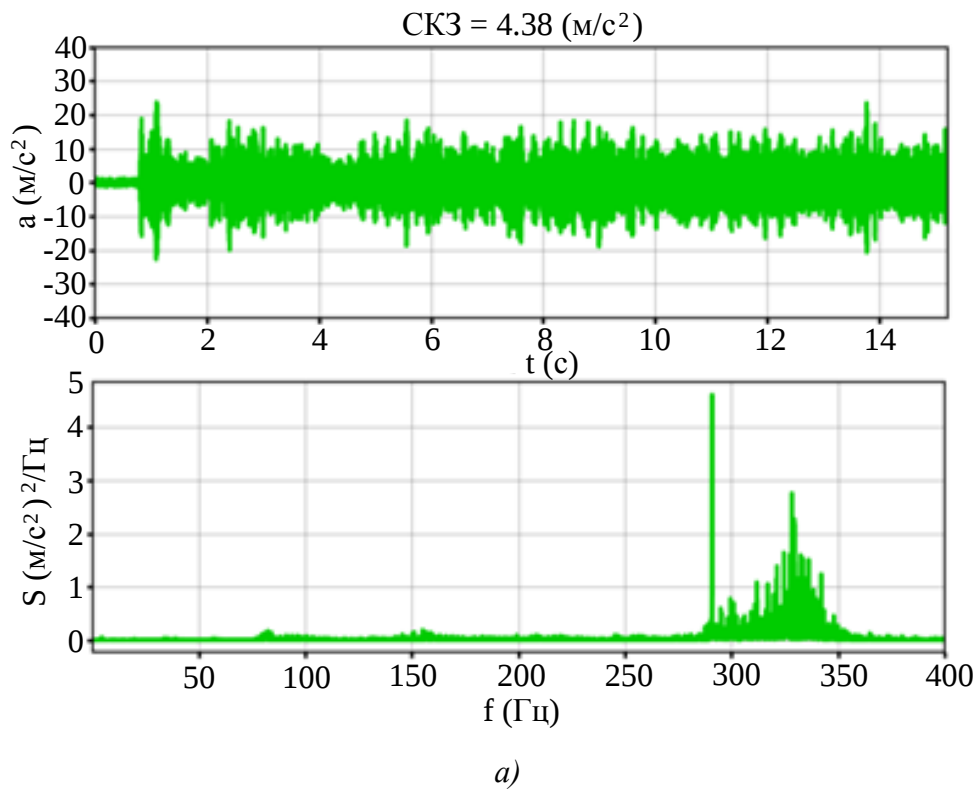


Рис. 3. Віброприскорення у вертикальному напрямі на колесах під час холостого ходу візка на 1-ій а, б та 2-ій в, г швидкостях руху.
а, в – модернізоване колесо; б, г – штатне колесо



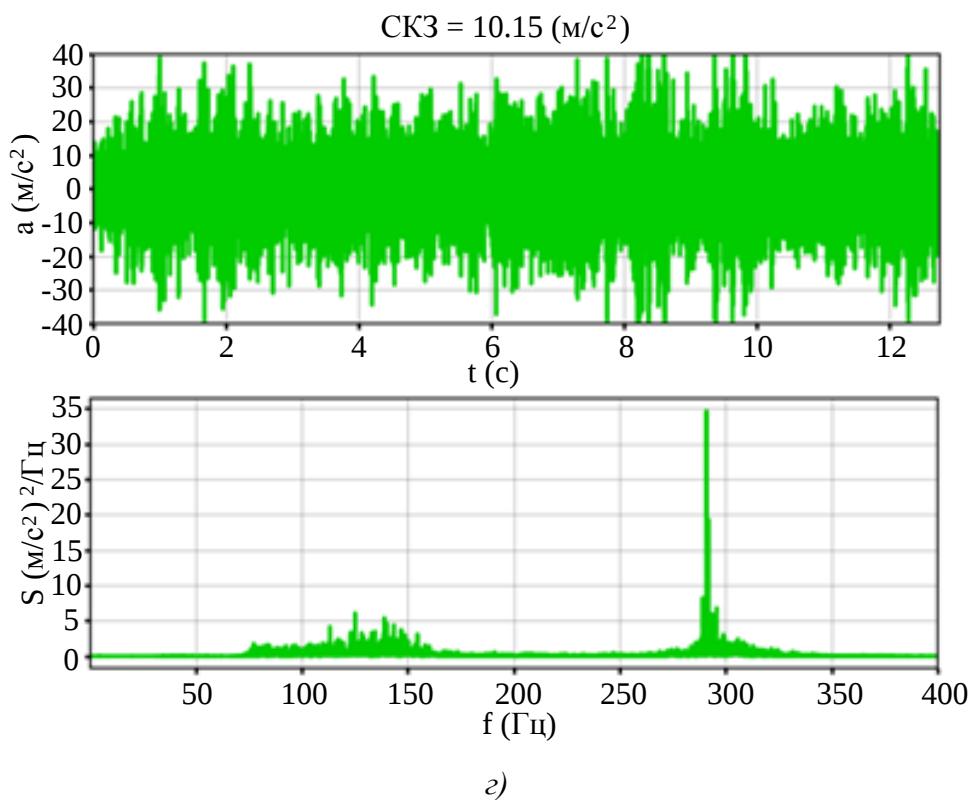
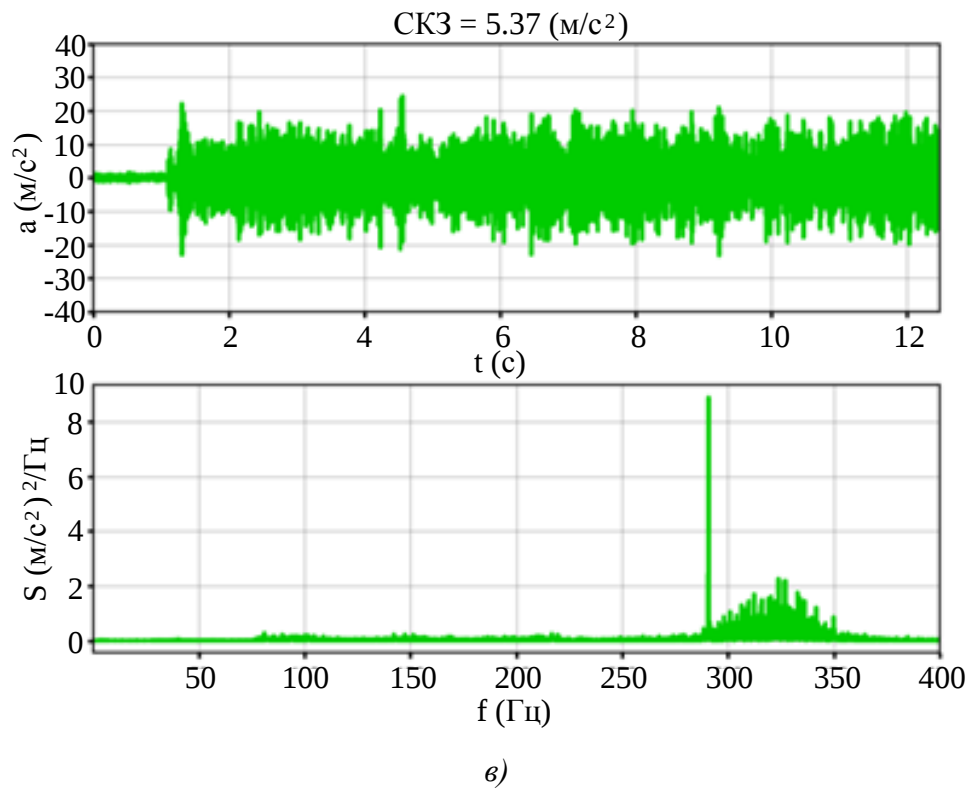
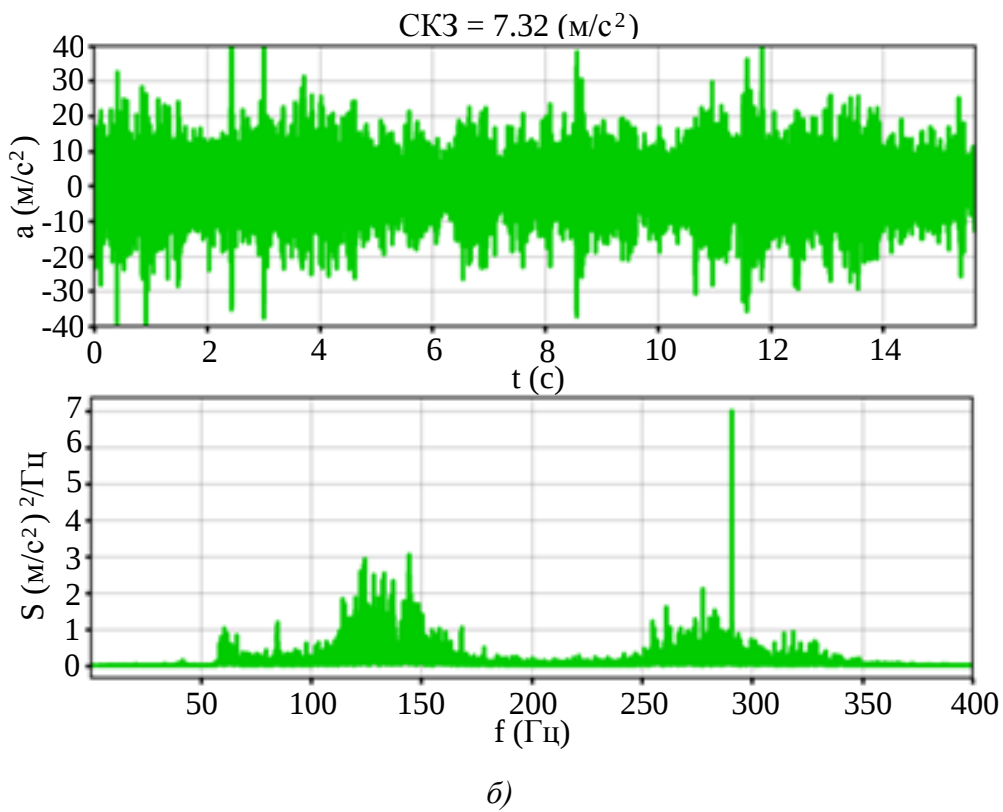
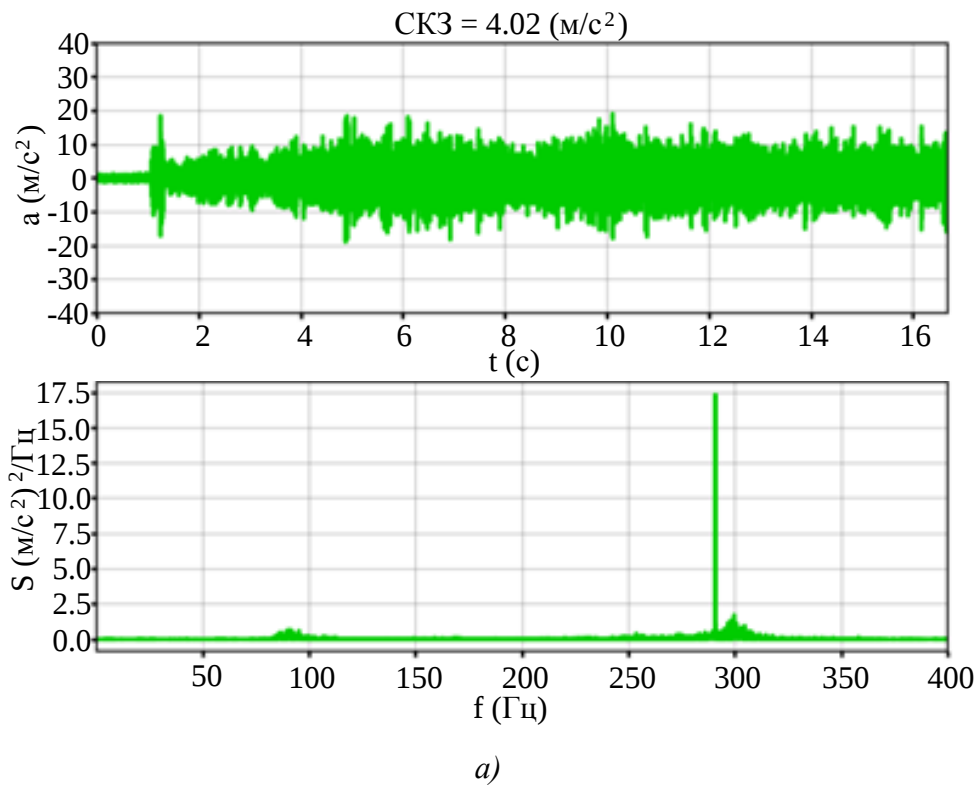


Рис. 4. Віброприскорення у вертикальному напрямі на колесах під час перевезення вантажу 0.5 тони на 1-ій а, б та 2-ій в, г швидкостях руху.
а, в – модернізоване колесо; б, г – штатне колесо



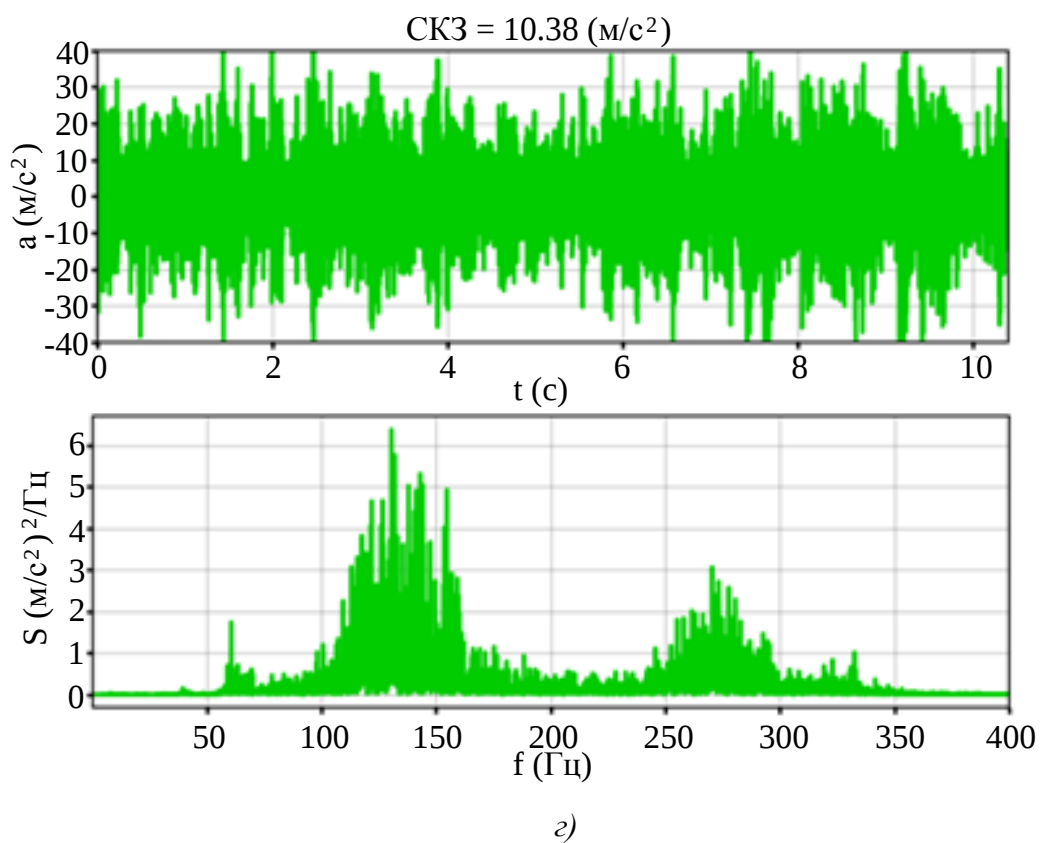
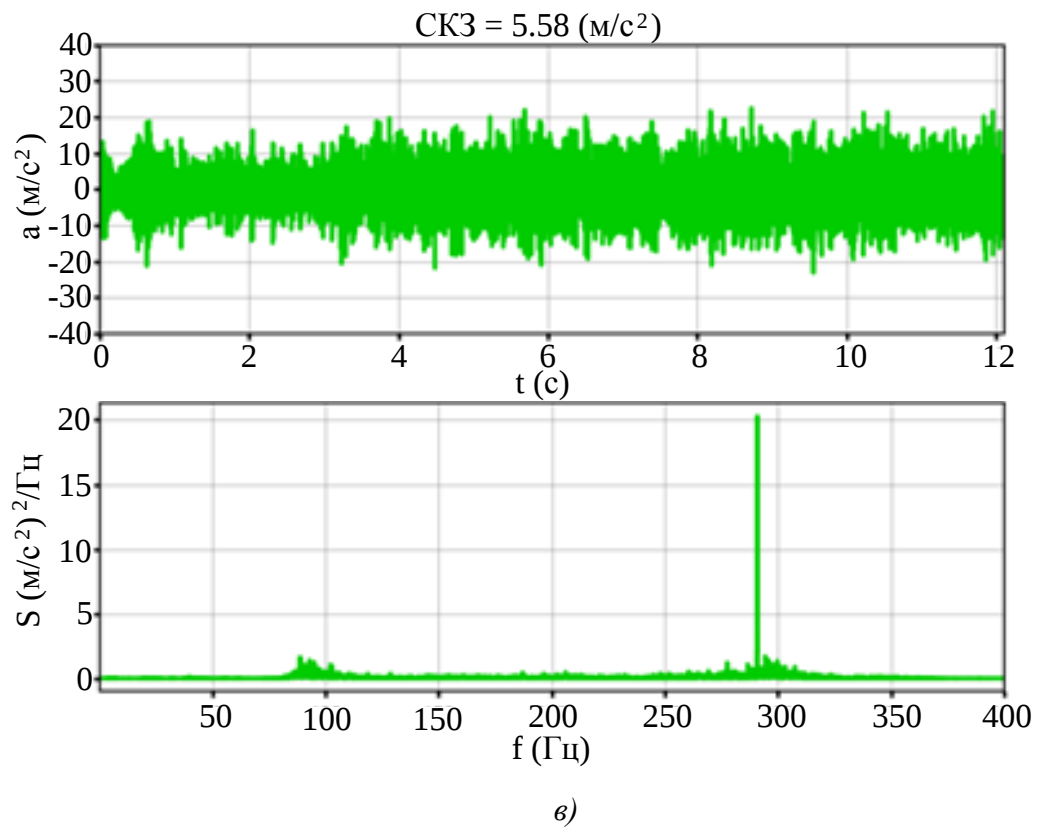


Рис. 5. Віброприскорення у вертикальному напрямі на колесах під час перевезення вантажу 2 тони на 1-ій а, б та 2-ій в, г швидкостях руху.
а, в – модернізоване колесо; б, г – штатне колесо

Результати отриманих експериментальних досліджень формування вібраційних ознак виникаючих в ходових колесах показують, що застосування еластичної гумової вставки значно зменшує їх рівень.

Обговорення результатів

Згідно отриманих даних експериментальних досліджень зробимо гістограму віброприскорень у вертикальному напрямі на модернізованому (з еластичною, гумовою вставкою) та штатному ведених колесах вантажного візка мостового крана на 1-ій швидкості руху (рис. 6).

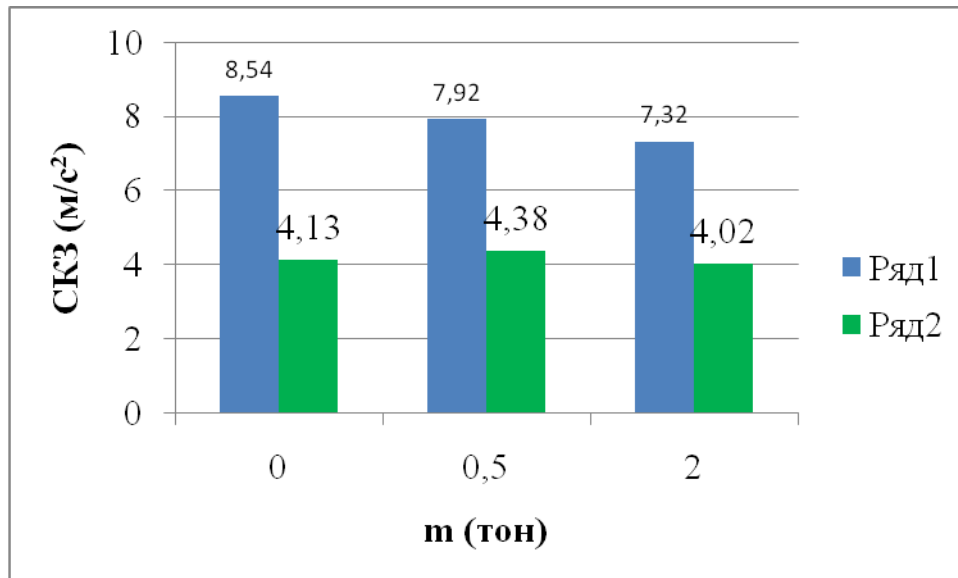


Рис. 6. Гістограма віброприскорень у вертикальному напрямі на ведених колесах вантажного візка мостового крана на 1-ій швидкості руху, ряд 1 – штатне колесо, ряд 2 – модернізоване колесо

За підсумками узагальнення результатів віброприскорень у вертикальному напрямі на модернізованому (з еластичною гумовою вставкою) та штатному ведених колесах проведемо розрахунок процентного співвідношення вертикальних вібрацій від модернізації коліс на 1-ій швидкості вантажного візка мостового крану, таблиця 2.

Таблиця 2

Процентні співвідношення вертикальних вібрацій
від модернізації коліс на 1-ій швидкості

Параметри	Значення		
Маса (тон)	0,0	0,5	2,0
СКЗ штатних коліс (м/с²)	8,54	7,92	7,32
СКЗ модернізованих коліс (м/с²)	4,13	4,38	4,02
Співвідношення (%)	51,64	44,70	45,08

Згідно отриманих даних експериментальних досліджень зробимо гістограму віброприскорень у вертикальному напрямі на модернізованому (з еластичною гумовою вставкою) та штатному ведених колесах вантажного візка мостового крана на 2-ій швидкості руху (рис. 7).

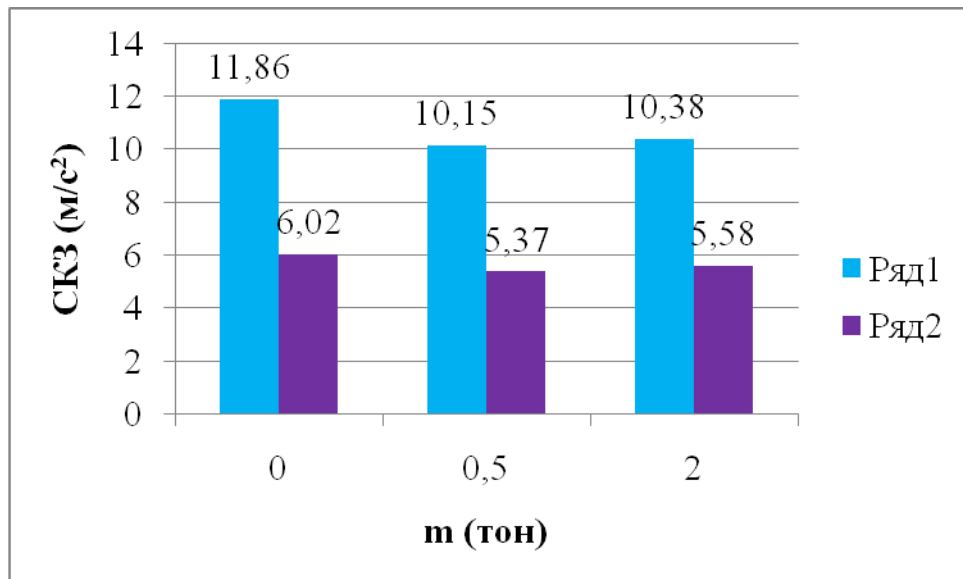


Рис. 7. Гістограма віброприскорень у вертикальному напрямі на ведених колесах вантажного візка мостового крана на 2-ій швидкості руху, ряд 1 – штатне колесо, ряд 2 – модернізоване колесо

За підсумками узагальнення результатів віброприскорень у вертикальному напрямі на модернізованому (з еластичною, гумовою вставкою) та штатному ведених колесах проведемо розрахунок процентного співвідношення вертикальних вібрацій від модернізації коліс на 2-ій швидкості вантажного візка мостового крана, таблиця 3.

Таблиця 3

Процентні співвідношення вертикальних вібрацій
від модернізації коліс на 2-ій швидкості

Параметри	Значення		
Маса (тон)	0,0	0,5	2,0
СКЗ штатних коліс (м/с²)	11,86	10,15	10,38
СКЗ модернізованих коліс (м/с²)	6,02	5,37	5,58
Співвідношення (%)	49,24	47,09	46,24

Проведене експериментальне дослідження підтверджує доцільність впровадження модернізованих коліс з еластичною гумовою вставкою на мостових кранах.

В подальшому необхідно провести експериментальне дослідження віброприскорення у осьовому напрямі на штатних та модернізованих колесах.

Висновки

Співвідношення вертикальних вібрацій від модернізації коліс під час пересування вантажного візка на першій швидкості руху складає: під час холостого ходу вантажного візка – 51,64 %; під час перевезення вантажу 0,5 тони – 44,70 %; під час перевезення вантажу 2,0 тони – 45,08 %.

Співвідношення вертикальних вібрацій від модернізації коліс під час пересування вантажного візка на другій швидкості руху складає: під час холостого ходу вантажного візка – 49,24 %; під час перевезення вантажу 0,5 тони – 47,09 %; під час перевезення вантажу 2,0 тони – 46,24 %.

Список використаних джерел

1. Haniszewski T. Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation. / T. Haniszewski // *Journal of vibroengineering*. – 2017. – Vol. 19, Iss. 1. – P. 75–86. doi: <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17310>
2. Analysis of the structural girders of a crane for the license renewal of a BWR Nuclear Power Plant. / J. C. Castro, E. H. Palafox, L. H. Gómez, G. S. Mendoza, Y. L. Grijalba, P. R. López // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. 17. – P. 115–122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.016>
3. Research on welding deformation for box girder of bridge crane based on thermal elasto-plastic theory. / T. Yifei, G. Zhihao, Z. Xingcheng, S. Guomin, L. Dongbo, L. Xiangdong // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10, № 5. – P. 1–12. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814018775885>
4. Dynamic reaction forces of an overhead crane on lifting. / B. Spruogis, A. Jakstas, V. Turla, I. Iljin, N. Sesok // *TRANSPORT*. – 2011. – Vol. 26, № 3. – P. 279–283. doi: <https://doi.org/10.3846/16484142.2011.622144>
5. Qin, Y. High precision analysis of stress concentration in girder structure of casting crane. / Y. Qin, J. Jiang, H. Yang // *International Journal of Science and Qualitative Analysis*. – 2016. – Vol. 2, № 2. – P. 14–18. doi: <https://doi.org/10.11648/j.ijsqa.20160202.11>
6. Modeling the resonance of a swinging spring based on the synthesis of a motion trajectory of its load. / L. Kutsenko, V. Vanin, O. Shoman, P. Yablonskiy, L. Zapolskiy, N. Hrytsyna, S. Nazarenko, V. Danylenko, E. Sivak, S. Shevchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 3/7, № 99. – P. 53–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.168909>
7. Development of a method for computer simulation of a swinging spring load movement path. / L. Kutsenko, O. Semkiv, A. Kalynovskiy, L. Zapolskiy, O. Shoman, G. Virchenko, V. Martynov, M. Zhuravskij, V. Danylenko, N. Ismailova // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 1, № 7-97. – P. 60–73. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154191>
8. Synthesis and classification of periodic motion trajectories of the swinging spring load. / L. Kutsenko, V. Vanin, O. Shoman, L. Zapolskiy, P. Yablonskiy, S. Vasyliiev, V. Danylenko, E. Sukharkova, S. Rudenko, M. Zhuravskij // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 2, № 7–98. – P. 2–37. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161769>
9. Meng W. Reliability analysis-based numerical calculation of metal structure of bridge crane. / W. Meng, Z. Yang, X. Qi, J. Cai // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2013. – Vol. 2013, № 1–5. – P. 1–5. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/260976>
10. Haniszewski T. Strength analysis of overhead traveling crane with use of finite element method. / T. Haniszewski // *Transport problems*. – 2014. – Vol. 9, № 1. – P. 19–26. <https://www.researchgate.net/publication/276235576>
11. Фідровська Н. М. Міцність трьохшарової циліндричної оболонки. / Н. М. Фідровська, Є. Д. Слепужніков, О. В. Чернишенко // *Науковий вісник будівництва*. – 2015. – Вип. 1, № 79. – С. 190–193. <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7456>
12. Фідровська Н. М. Визначення оптимальних параметрів ходових коліс мостових кранів. / Н. М. Фідровська, Є. Д. Слепужніков // *Науковий вісник будівництва*. – 2012. – Вип. 69. – С. 215–222. <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7436>
13. Increase of operating reliability of the travel wheel using the use of the elastic inserts. / N. Fidorovska, E. Slepuzhnikov, O. Larin, I. Varchenko, V. Lipovyi, K. Afanasenko, S. Harbuz // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2020. – Vol. 5, № 30. – P. 69–79. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001387>
14. Mathematical and S-models of cargo oscillations during movement of bridge crane. / S. V. Raksha, P. G. Anofriev, V. M. Bohomaz, O. S. Kuropiatnyk // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2019. – Vol. 2. – P. 108–115. doi: 10.29202/nvngu/2019-2/16.

15. Артамонов Д. Н. Модернизация механизма передвижения тележки мостового крана / Д. Н. Артамонов, А. М. Петров // Молодой исследователь. – 2017. – Вып. 5, № 8. – С. 12–16.
16. Zelic A. Experimental determination of lateral forces caused by bridge crane skewing during travelling. / A. Zelic, N. Zuber, R. Sostakov // *Eksplotacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. – 2018. – Vol. 20, № 1. – P. 90–99. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.1.12>
17. Gankevich V. F. Ways to enhance the reliability of wheel pairs of locomotive transport. / V. F. Gankevich, L. V. Gryaznova, A. G. Lisnyak, // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2012. – Vol. 5. – P. 76–79.

References

1. Haniszewski, T 2017, 'Modeling the dynamics of cargo lifting process by overhead crane for dynamic overload factor estimation', *Journal of vibroengineering*, vol. 19, iss. 1, pp. 75-86.
2. Castro, JC, Palafox, EH, Gómez, LH, Mendoza, GS, Grijalba, YL & López, PR 2019, 'Analysis of the structural girders of a crane for the license renewal of a BWR Nuclear Power Plant', *Procedia Structural Integrity*, vol. 17, pp. 115-122.
3. Yifei, T, Zhihao, G, Xingcheng, Z, Guomin, S, Dongbo, L & Xiangdong, L 2018, 'Research on welding deformation for box girder of bridge crane based on thermal elasto-plastic theory', *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 1-12.
4. Spruogis, B, Jakstas, A, Turla, V, Iljin, I & Sesok, N 2011, 'Dynamic reaction forces of an overhead crane on lifting', *TRANSPORT*, vol. 26, no. 3, pp. 279-283.
5. Qin, Y, Jiang, J & Yang, H 2016, 'High precision analysis of stress concentration in girder structure of casting crane', *International Journal of Science and Qualitative Analysis*, vol. 2, no. 2, pp. 14-18.
6. Kutsenko, L, Vanin, V, Shoman, O, Yablonskyi, P, Zapolskiy L, Hrytsyna, N, Nazarenko, S, Danylenko, V, Sivak, E & Shevchenko, S 2019, 'Modeling the resonance of a swinging spring based on the synthesis of a motion trajectory of its load', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3/7, no. 99, pp. 53-64.
7. Kutsenko, L, Semkiv, O, Kalynovskyi, A, Zapolskiy, L, Shoman, O, Virchenko, G, Martynov, V, Zhuravskij, M, Danylenko, V & Ismailova, N 2019, 'Development of a method for computer simulation of a swinging spring load movement path', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 7-97, pp. 60-73.
8. Kutsenko, L, Vanin, V, Shoman, O, Zapolskiy, L, Yablonskyi, P, Vasyliiev, S, Danylenko, V, Sukharkova, E, Rudenko, S & Zhuravskij, M 2019, 'Synthesis and classification of periodic motion trajectories of the swinging spring load', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, no. 7-98, pp. 2-37.
9. Meng, W, Yang, Z, Qi, X & Cai, J 2013, 'Reliability analysis-based numerical calculation of metal structure of bridge crane', *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, no. 1-5, pp. 1-5.
10. Haniszewski, T 2014, 'Strength analysis of overhead traveling crane with use of finite element method', *Transport problems*, vol. 9, no. 1, pp. 19-26.
11. Fidrovskaya, NM, Slepuzhnikov, ED & Chernyshenko, OV 20105, 'Mitsnist trokhsharovoi tsylindrychnoi obolonky', *Naukovyi visnyk budivnytstva*, iss. 1, no. 79, pp. 190-193.
12. Fidrovskaya, NM & Slepuzhnikov, ED 2012, 'Vyznachennia optymalnykh parametriv khodovykh kolis mostovykh kraniv', *Naukovyi visnyk budivnytstva*, iss. 69, pp. 215-222.
13. Fidrovskaya, N, Slepuzhnikov, E, Larin, O, Varchenko, I, Lipovyi, V, Afanasenko, K & Harbuz, S 2020, 'Increase of operating reliability of the travel wheel using the use of the elastic inserts', *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 5, no. 30, pp. 69-79.
14. Raksha, SV, Anofriev, PG, Bohomaz, VM & Kuropiatnyk, OS 2019, 'Mathematical and S-models of cargo oscillations during movement of bridge crane', *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, vol. 2, pp. 108-115.
15. Artamonov, DN & Petrov, AM 2017, 'Modernizatsiya mekhanizma peredvizheniya telezhki mostovogo kрана', *Molodoy issledovatel*, iss. 5, no. 8, pp. 12-16, viewed 11 November 2020, <http://mid-journal.ru/upload/iblock/18e/2_artamonov_12_16.pdf>.
16. Zelic, A, Zuber, N & Sostakov, R 2018, 'Experimental determination of lateral forces caused by bridge crane skewing during travelling', *Eksplotacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*, vol. 20, no. 1, pp. 90-99.
17. Gankevich, VF, Gryaznova, LV & Lisnyak, AG 2012, 'Ways to enhance the reliability of wheel pairs of locomotive transport', *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, vol. 5, pp. 76-79, viewed 11 November 2020, <<https://nvngu.in.ua/index.php/ru/component/jdownloads/finish/35-05/565-2012-5-gankev/0>>.

Стаття надіслана до редакції 01 грудня 2020 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-33-44

УДК 621.923

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСУ КРУГІВ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ ЗІ ЗМІННОЮ ПОЛЯРНІСТЮ ЕЛЕКТРОДІВ В ЗОНІ РІЗАННЯ

©Стрельчук Р.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Інформація про автора:

Стрельчук Роман Михайлович: ORCID: 0000-0002-7221-031X; r.m.strelchuk@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

Істотний вплив на точність обробки виробу і продуктивність процесу електроерозійного шліфування надає знос круга. Для ефективного управління точністю обробки найбільш істотне значення має похибка, викликана зносом алмазного круга. Правку круга необхідно виробляти, коли знос підходить до границі, але не виходить за межі поля допуску. Це дозволить скоротити кількість браку при обробці і скоротити витрату алмазів. Крім того, при цьому скорочується час правки і відповідно підвищується ефективність електроерозійного шліфування.

Наведено методику та результати експериментальних досліджень зносу профільних алмазних кругів. Дослідження питомої витрати алмазів виконувалися на шліфувальних кругах прямого профілю. Вимірювання величини лінійного зносу круга вироблялося безконтактним методом за допомогою спеціального приладу, заснованого на застосуванні струмових датчиків. Після цього визначалася інтегральна величина зношеного обсягу алмазоносного шару, а потім маса витрачених алмазів. Маса зішліфованого матеріалу визначалася шляхом зважування до і після обробки.

Для встановлення функціональної залежності питомої витрати алмазів від технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару використовувався математичний метод планування і аналізу експериментів. В результаті регресійного аналізу була отримана функціональна залежність питомої витрати алмазів від наступних факторів: концентрації алмазів в крузі, зернистості інструменту, швидкості шліфувального круга, глибини шліфування і швидкості виробу.

Для визначення закономірностей зносу фасонного алмазного круга отримували відбиток його профілю на контрольній пластині з твердого сплаву і вимірювали координати точок робочої частини профілю щодо непрацюючих ділянок. Визначаючи різницю координат до і після досвіду, знаходили величину радіального зносу шліфувального круга у відповідній точці профілю.

Ключові слова: електроерозійне шліфування, питома витрата алмазів, технологічні режими обробки, характеристики круга.

Стрельчук Р.М. „Исследование износа кругов при электроэрозионном алмазном шлифовании с изменяющейся полярностью электродов в зоне резания“.

Существенное влияние на точность обработки изделия и производительность процесса электроэрозионного шлифования оказывает износ круга. Для эффективного

управления точностью обработки наиболее существенное значение имеет погрешность, вызванная износом алмазного круга. Правку круга необходимо производить, когда износ подходит к границе, но не выходит за пределы поля допуска. Это позволило сократить количество брака при обработке и сократить расход алмазов. Кроме того, при этом сокращается время правки и соответственно повышается эффективность электроэрозионного алмазного шлифования.

Приведены методика и результаты экспериментальных исследований износа алмазных кругов. Исследования удельного расхода алмазов выполнялись на шлифовальных кругах прямого профиля. Измерение величины линейного износа круга производилось бесконтактным методом с помощью специального прибора, основанного на применении токовых датчиков. После этого определялась интегральная величина изношенного объема алмазоносного слоя, а затем масса израсходованных алмазов. Масса сошлифованного материала определялась путем взвешивания до и после обработки.

Для установления функциональной зависимости удельного расхода алмазов от технологических режимов обработки и параметров алмазосодержащего слоя использовался математический метод планирования и анализа экспериментов. В результате регрессионного анализа была получена функциональная зависимость удельного расхода алмаза от следующих факторов: концентрации алмазов в круге, зернистости инструмента, скорости шлифовального круга, глубины шлифования и скорости изделия.

Для определения закономерностей износа фасонного алмазного круга получали отпечаток его профиля на контрольной пластине из твердого сплава и измеряли координаты точек рабочей части профиля относительно неработавших участков. Определяя разность координат до и после опыта, находили величину радиального износа шлифовального круга в соответствующей точке профиля.

Ключевые слова: электроэрозионное шлифование, удельный расход алмазов, технологические режимы обработки, характеристики круга.

Strelchuk R. "Research into the wear of wheels during electroerosive diamond grinding with variable polarity of the electrodes in the cutting area".

The electro-erosive wheel dressing exerts a significant impact on the machining accuracy of a piece and the efficiency of the profile grinding process. To effectively control machining accuracy, the most important is the error due to the wear of a diamond wheel. The wheel should be dressed when wear approaches to the border but does not go beyond the tolerance field. This would reduce the number of defects at machining and bring down the utilization of diamonds. In addition, this reduces the dressing time and, therefore, improves the efficiency of profile diamond grinding.

The paper reports the methodology and results of an experimental study into the wear of profiled diamond wheels. The specific utilization of diamonds was examined on the grinding wheels of the direct profile. The amount of a wheel linear wear was measured by a contactless method applying a special device based on the use of eddy current sensors. This was followed by determining the integrated amount of the worn volume of a diamond layer; after that, the weight of the used diamonds was measured. The mass of the sanded material was determined by weighing it before and after machining.

A mathematical method of planning and analysing experiments was used to establish the functional dependence of the specific utilization of diamonds on the technological machining modes

and the diamond layer parameters. The result of a regression analysis is the derived functional dependence of diamond specific utilization on the following factors: the concentration of diamonds in a wheel, the grit of the tool, the grinding wheel velocity, the depth of grinding, and the speed of a piece.

To determine the patterns of the wear of the shaped diamond wheel, we received an imprint of its profile on a control plate made from a solid alloy and measured the coordinates of the points of the working part of the profile relative to the non-utilized areas. Determining the difference of coordinates before and after the experiment has helped find the amount of the radial wear of the grinding wheel at the appropriate profile point.

Keywords: electro-erosive grinding, specific diamond utilization, technological machining modes, wheel characteristics.

Вступ

В сучасних умовах конкурентоспроможність в машинобудуванні визначається, перш за все, якістю продукції. Найбільш гостро проблема забезпечення якості продукції стоїть при виготовленні деталей складної конфігурації з важкооброблюваних матеріалів, серед яких особливе місце займають тверді сплави.

У різних галузях промисловості знаходять широке застосування вироби складної конфігурації поверхні. Які виготовляються з важкооброблюваних матеріалів, таких як тверді сплави, кераміка, магнітні сплави, ферити і т. п. Підвищені вимоги, що пред'являються до точності геометричних параметрів і якості оброблених поверхонь, значно підвищують роль алмазної обробки.

Удосконалення технології виробництва алмазного інструменту створили реальні передумови для впровадження в промисловість процесу електроерозійного шліфування.

Виділимо наступні сфери застосування профільних алмазних кругів: обробка фасонних твердосплавних ріжучих і вимірювального інструментів, обробка виробів основного виробництва (не інструментальних), що виготовляються з важкооброблюваних матеріалів і мають складну форму, а також правка абразивного інструменту.

Особливо перспективно впровадження електроерозійного алмазного шліфування в інструментальне виробництво.

Відомо, що фасонний різальний і вимірювальний інструмент є найбільш трудомісткими з усієї номенклатури виробів інструментального виробництва, причому його застосування зростає завдяки високій стійкості розмірів за профілем. Використання електроерозійного шліфування алмазним кругом дозволило скоротити час виготовлення фасонних твердосплавних різців, при цьому усунулася необхідність в операції ручного доведення, а стійкість різців зросла в 2 ... 2,5 рази.

Профільні алмазні інструменти можуть широко використовуватися при виготовленні твердосплавних штампів, цанг з твердосплавними сплавленими, висадного інструменту, твердосплавних різьбонакатних роликів, мітчиків, Розкатники і іншого інструменту, виготовленого з твердого сплаву.

При виготовленні твердосплавних монолітних свердел і інших кінцевих інструментів електроерозійне шліфування знайшло широке застосування для вишліфовки канавок.

Практика показує, що при затилюванні задньої поверхні фасонних твердосплавних фрез і протяжок профільне алмазне шліфування є єдино прийнятним технологічним процесом.

У зв'язку з цим тема роботи, спрямована на вдосконалення технології правки і розробку на цій основі рекомендацій щодо підвищення ефективності операцій електроерозійного алмазного шліфування, є актуальною.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Найбільш ефективним і універсальним методом правки алмазних кругів на металевих зв'язках зі складною геометрією робочої поверхні є електроерозійний [1]. В результаті проведеного аналізу встановлено, що умови правки шліфувального круга істотно впливають на технологічні показники процесу електроерозійного шліфування і, отже, є важливим керуючим фактором на шліфувальних операціях [2]. Разом з тим, пов'язані питання із забезпеченням необхідної точності і підвищення розмірної стійкості профільних алмазних шліфувальних кругів в умовах електроерозійної правки залишаються невирішеними. Не розроблено науково обґрунтованих практичних рекомендацій, щодо вдосконалення технології правки алмазних шліфувальних кругів електроерозійним методом.

В роботі [3] наведені результати досліджень по шліфуванню фасонних поверхонь. Показано, що за цим способом шліфування фасонних поверхонь профіль виробу будь-якої складності розбивається на окремі ділянки, що представляють собою дуги кіл і відрізки прямих ліній. Кожна ділянка обробляється алмазним кругом найпростішої форми (циліндричної, конічної і т. п.). Кількість послідовно працюючих інструментів залежить від складності конфігурації профілю виробу. Такий спосіб шліфування фасонних поверхонь малопродуктивний. Причиною цього можуть бути витрати технологічного і допоміжного часу, що робить відповідний спосіб трудомістким і малопродуктивним. Крім того, при його використанні значно важче забезпечити високу точність обробки в зв'язку з необхідністю перевстановлення кругів.

Варіантом подолання відповідних труднощів може бути спосіб шліфування фасонної поверхні виробу, який виробляється профільованим алмазним кругом, профіль якого є, дзеркальне відображення профілю готового виробу. На відміну від попереднього способу, в цьому випадку виконується одночасна обробка всіх ділянок профілю.

Саме такий підхід використаний в роботі [4], де показано застосування профільних алмазно-абразивних інструментів з надтвердих матеріалів (алмазу, кубічного нітриду бору). Використання профільних алмазно-абразивних інструментів з надтвердих матеріалів дозволило розробити високоефективні технологічні процеси шліфування, використовувані в різних галузях промисловості.

Застосування профільних кругів діаметром 350 мм і висотою 15 мм при шліфуванні на прохід твердосплавних мітчиків дозволило підвищити продуктивність обробки в 5 ... 8 разів [5]. Стійкість круга між правками підвищилася майже в 10 разів у порівнянні з алмазними одонитковим колами.

Взаємопов'язані питання підвищення розмірної стійкості профільних алмазних шліфувальних кругів і активного управління геометрією робочої поверхні шліфувального інструменту в процесі обробки практично не розглядалися [6].

Відсутні рекомендації щодо визначення необхідної періодичності правки профільних алмазних шліфувальних кругів при обробці виробів складної форми, а також відсутні системні принципи вирішення питань цільової модернізації шліфувальних верстатів.

Таким чином, відсутній єдиний підхід до вирішення окремих питань забезпечення точності і ефективності електроерозійного алмазного шліфування.

Суперечливий характер наявних в літературі відомостей [7, 8], їх розрізненість, а в ряді випадків відсутність необхідної інформації призводить до необхідності проведення комплексних теоретичних і експериментальних досліджень. Ці дослідження дозволять розширити технологічні можливості профільного алмазного шліфування в плані забезпечення точності і ефективності обробки виробів складної конфігурації.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого зносу алмазних кругів. Також в ході дослідження потрібно визначити шляхи підвищення точності і продуктивності електроерозійного алмазного шліфування за рахунок розкриття основних закономірностей зносу круга.

Мета і завдання дослідження

Мета роботи - встановити закономірності зносу алмазного круга в процесі обробки і формування його робочої поверхні. Це дасть можливість підвищити точність і продуктивність електроерозійного алмазного шліфування. Для досягнення цієї мети вирішувалася наступне завдання:

- дослідити вплив технологічних режимів шліфування і параметрів алмазовмісного шару інструменту на питому витрату круга.

Матеріали і методи дослідження

Експериментальні дослідження проводилися на спеціальному стенді, виконаному на базі плоскошліфовального верстата 3Е711В, модернізація якого полягала в забезпеченні уповільненої обертання алмазного круга, застосуванні змінних шківів і установці пристосування для правки круга. Вимірювання лінійного зносу алмазного круга здійснювалося за допомогою вихрострумівий датчикової системи наступним чином [9]. У торці діелектричного наконечника вихретокового датчика (ВТД) знаходиться котушка індуктивності (рис. 1).

Генератор забезпечує збудження електромагнітних коливань в котушці, в результаті чого виникає електромагнітне поле. У свою чергу поле взаємодіє з матеріалом контрольованого об'єкта і на його поверхні наводяться вихрові струми, які змінюють параметри котушки - її активний і індуктивний опір. Зазначені параметри міняються при зміні зазору між контрольованим об'єктом і торцем датчика. Для вимірювання використовувався диференційний вихрострумівий датчик, що працює на частоті 30 МГц, який отримує живлення від генератора високої частоти і складається з вимірювального і опорного контурів. Встановлено, що найбільш доцільно використовувати в датчику котушку, що входить до складу резонансного контуру і має дуже слабкий зв'язок з контуром генератора. Робоча точка вибиралася на середині схилу резонансної кривої контура. У початковому стані обидва контури налаштовувалися на одну і ту ж частоту. Опорний контур встановлювався в безпосередній близькості від корпусу круга, вимірювальний поблизу алмазоносного шару (рис. 2). Обидва контури датчика, а також всі радіодеталі в схемі, герметизувалися.

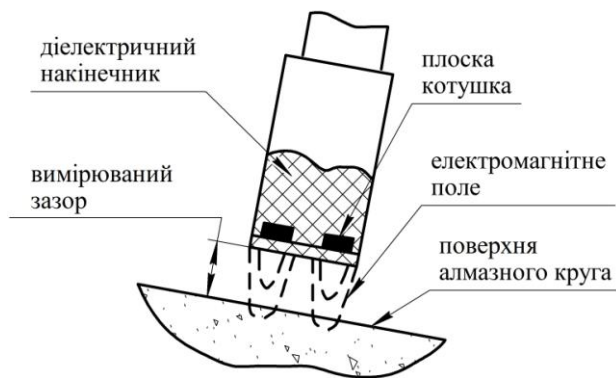


Рис. 1. Схема вихретокового датчика

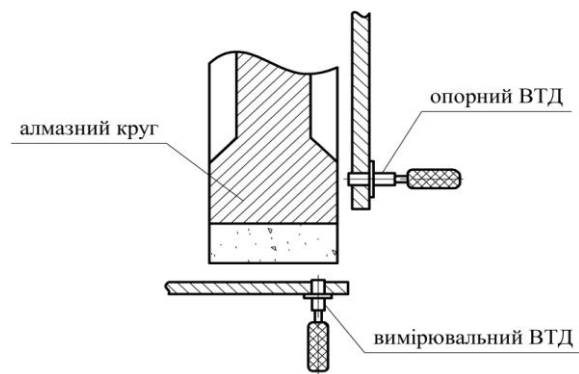


Рис. 2. Схема безконтактного вимірювання лінійного зносу алмазного круга

Завдяки тому, що обидва контури датчика знаходяться в безпосередній близькості від кола і працюють в однакових умовах, вдалося уникнути похибок, пов'язаних з вібраціями системи, впливом змазує охолоджуючої технологічної середовища (СОТС) і температурними деформаціями. Датчики мають малі габарити, прості у використанні і легко встановлюються на верстаті.

Підстроювання датчиків проводилася подачею постійної напруги на два зустрічно включених варикапа, підключених паралельно конденсатору контуру. Високочастотну напругу, що виникає на контурі після детектування, посилювалося і подавалося на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) комп'ютера. Таким чином, вихідна напруга використовувалося для оцінки зазору між торцем датчика вимірювального контуру і кругом. Зміна величини зазору між датчиком і кругом до обробки виробу і після обробки дозволяє визначити величину зносу.

Таріровка вихрострумівий датчикової системи проводилася при допомозі спеціального пристрою, який дозволяє з високою точністю змінювати величину зазору. Таріровка показала, що зі зміною зазора вихідний сигнал змінюється нелінійно, проте робота на лінійній ділянці графіка забезпечує можливість реєстрації зміни зазору в межах 0 ... 150 мкм з точністю ± 3 мкм. При цьому напруга вихідного сигналу змінювалося на 8 мВ, при збільшенні зазору між торцем датчика та поверхнею алмазного шліфувального круга на 1 мкм. Був розроблений прилад для реєстрації зносу кола в програмному пакеті Matlab, структурна схема приладу якого представлена на рис. 3 [10].

Аналоговий сигнал з каналу аналогового введення даних 2 надходить на плату введення / виведення (АЦП) 3, де відбувається його переклад в цифрову форму. Потім чисельне значення, відповідне аналоговому сигналу, подається на блок 4, де множиться на число, яке встановлює співвідношення між зазором і напругою. Далі в блоці 5 з отриманої величини віднімається первонапочальное значення зазору, відповідне нульового значення зносу кола Δr . Після цього визначається значення лінійного зносу алмазного круга в даний момент часу, яке фіксується на лицьовій панелі приладу 7. Шкала приладу 7 проградуїрована в одиницях виміру зносу - в мікрометрах.

Обсяг зношеної частини алмазоносного шару знаходився як:

$$V_{\text{изн}} = \pi D_{\kappa} H \Delta_r, \quad (1)$$

де D_k – діаметр алмазного круга, мм, H – ширина алмазного круга, мм (рис. 4).

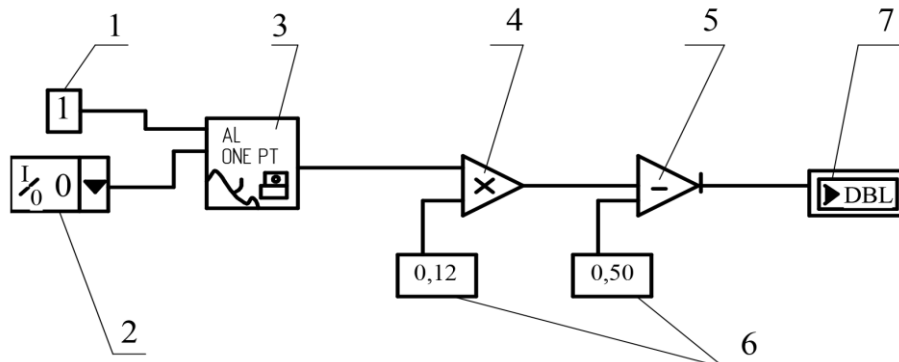


Рис. 3. Структурна схема приладу для реєстрації зносу круга: 1 - номер пристрою, присвоєний платі введення / виведення; 2 - канал аналогового введення даних; 3 - плата вводу / виводу (АЦП); 4 - блок множення; 5 - блок віднімання; 6 - блок формування констант; 7 - лицьова панель приладу.

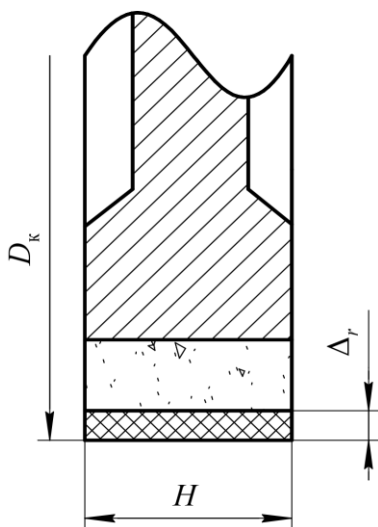


Рис. 4. Схема до визначення питомої витрати алмазів шліфувального круга

Питома витрата алмазів обчислювалася за формулою:

$$q_m = \frac{0,878V_{изн}}{\alpha_k Q_M}, \quad (2)$$

де α_k - коефіцієнт, що враховує концентрацію алмазів в шарі; Q_M - маса зішліфованого матеріалу, г

Маса ішліфованого матеріалу визначалася шляхом зважування (на аналітичних вагах з точністю до 0,1 мг) алмазного шліфувального круга до і після обробки. Дослідження питомої витрати на ділянках профілю з малими радіусами кривизни виконувалися при плоскому врізному шліфуванні зразків з твердого сплаву T15K6 алмазними колами 14EE1 250 × 6 × 76 × 5 різної характеристики з кутом профілю $\phi = 60^\circ$. Обробка проводилася з глибиною шліфування (врізна подача) $t = 0,05$ мм.

Обсяг зношеної частини алмазовмісного шару кола дорівнюватиме:

$$V_a = \pi D_{к.изн} F_{изн}, \quad (3)$$

де $D_{к.изн}$ – діаметр шліфувального круга після зносу, мм; $F_{изн}$ – площа зношеної частини круга в осьовому перерізі.

Для отримання функціональної залежності питомої витрати алмазного круга від технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару інструменту був використаний метод планування експериментів. На основі проведеного якісного аналізу та результатів попередніх експериментів при побудові математичної моделі в якості факторів були обрані: K - концентрація алмазів в крузі; Z - зернистість алмазних кругів, мкм; V_k -

швидкість шліфувального круга, м/с; t - глибина шліфування, мм; $V_{\text{ш}}$ - швидкість виробу, м/хв.

Рівні та інтервали варіювання досліджуваних факторів приведені в табл. 1. З метою отримання статичної залежності здійснювалося перетворення параметра оптимізації шляхом логарифмування.

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання факторів

Натуральне позначення фактора	K	Z , мкм	V_k , м/с	t , мм	$V_{\text{ш}}$, м/хв
Кодове позначення фактора	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Верхній рівень	6 (150 %)	200 (160/125)	35	0,125	16
нижній рівень	2 (50 %)	40 (50/40)	15	0,025	2
основний рівень	4 (100 %)	120 (100/80)	25	0,075	9
інтервал варіювання	2 (50 %)	80	10	0,05	7

Для спрощення запису умов експерименту і обробки отриманих даних замість натуральних значень факторів використовувалися кодовані. Кодування здійснювалося за допомогою співвідношення:

$$X_i = \frac{2(\ln x_i - \ln x_{\text{max}})}{\ln x_{\text{imax}} - \ln x_{\text{imin}}} + 1, \quad (4)$$

де x_{imax} , x_{imin} – відповідно, значення факторів на верхньому і нижньому рівнях.

У зв'язку з великою трудомісткістю реалізації повного факторного експерименту був використаний дробовий факторний експеримент типу 2^{5-1} , тобто напіврепліки від повного факторного плану 2^5 , задана генеруючим співвідношенням:

$$X_5 = X_1 X_2 X_3 X_4 .$$

При цьому визначальний контраст має вигляд:

$$I = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 .$$

Співвідношення, які визначають спільні оцінки коефіцієнтів регресії, знаходили множенням визначального контрасту послідовно на X_1 , X_2 і т. д. Аналіз показав, що в даному випадку ні один з лінійних ефектів не змішується з парним взаємодією, а оцінюється спільно з взаємодією високих порядків. Отже, роздільна здатність обраної дробової репліки є максимально можливою. Матриця планування і результати експериментів наведені в табл. 2. Досліди проводилися в випадковій послідовності відповідно до даних табл. № 2 рівномірно розподілених випадкових чисел. Експерименти повторювалися тричі на кожному досвіді. У

табл. № 2 наведено середнє значення питомої витрати алмазного круга $\bar{q}_m$. В результаті математичної обробки даних були визначені коефіцієнти регресії. Зіставлення абсолютних значень коефіцієнтів регресії з величиною довірчого інтервалу показало, що статистично значущими є коефіцієнти b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 .

Таблиця 2

Матриця планування і результати дослідів

№ дослідів	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Питома витрата алмазного круга $\bar{q}_m$, мг/г
1	2	40	15	0,025	16	0,735
2	6	40	15	0,025	2	0,195
3	2	200	15	0,025	2	0,085
4	6	200	15	0,025	16	0,160
5	2	40	35	0,025	2	0,240
6	6	40	35	0,025	16	0,360
7	2	200	35	0,025	16	0,165
8	6	200	35	0,025	2	0,050
9	2	40	15	0,125	2	1,430
10	6	40	15	0,125	16	2,290
11	2	200	15	0,125	16	1,070
12	6	200	15	0,125	2	0,310
13	2	40	35	0,125	16	2,570
14	6	40	35	0,125	2	0,720
15	2	200	35	0,125	2	0,32
16	6	200	35	0,125	16	0,520

Гіпотеза про адекватність моделі перевірялася за критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (5)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності, S_y^2 – дисперсія відтворюваності.

Дисперсія адекватності S_{ad}^2 розраховувалася за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n(\bar{y} - \hat{y})^2}{N - \lambda}, \quad (6)$$

де $\bar{y}$ – середнє значення окремого спостереження, $\hat{y}$ – розрахункове значення критерію за рівнянням регресії, n – число повторень даного досвіду, N – загальне число дослідів, λ – число коефіцієнтів рівняння.

Дисперсія відтворюваності S_y^2 визначається з виразу:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{uj} - \bar{y}_u)^2}{N(n-1)}, \quad (7)$$

де N – загальне число дослідів, n – число повторень даного досвіду, y_{uj} – результати окремого спостереження, $\bar{y}_u$ – середнє арифметичне значення критерію.

Адекватність моделі перевірялася за критерієм Фішера. Знайдене з рівняння (5) значення F - порівнювалося з табличним. Розрахункове значення критерію виявилось менше табличного при 95% -му рівні значущості, отже, отримане рівняння є адекватним.

Таким чином, рівняння регресії в кодових координатах має вигляд:

$$y = -0,93 - 0,19X_1 - 0,59X_2 - 0,14X_3 + 0,78X_4 + 0,44X_5.$$

Після розкодування і потенціювання була отримана шукана функціональна залежність питомої витрати алмазу від досліджуваних факторів:

$$q_m = \frac{t^{0,56} V_u^{0,44}}{K^{0,27} Z^{0,74} V_k^{0,24}}. \quad (8)$$

Функціональна залежність показує рівень впливу на питому витрату алмазних кругів технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару інструменту.

Обговорення результатів дослідження

На рис. 5 представлена графічна залежність питомої витрати від параметрів алмазовмісного шару. Збільшення зернистості алмазного порошку викликає зниження питомої витрати. Даний отриманий результат можна пояснити тим, що при збільшенні розмірів зерен підвищується міцність їх закріплення в зв'язці круга. Збільшення концентрації алмазів в шарі веде до зростання кількості ріжучих зерен. У свою чергу, це призводить до зниження навантаження на зерно і, відповідно, до зменшення питомої витрати алмазів.

З технологічних режимів обробки найбільший вплив на величину питомої витрати надає глибина шліфування (врізна подача). Збільшення глибини шліфування призводить до зростання питомої витрати алмазів (рис. 6). З графіка, наведеного на рис. 6, видно, що збільшення швидкості виробу призводить до зростання питомої витрати. Так як при цьому збільшується товщина шару матеріалу, що знімається одним зерном. У той же час сили тертя в зоні контакту круга з виробом змінюються незначно. Тому зміна швидкості виробу чинить менший вплив на питому витрату алмазів, ніж зміна глибини шліфування.

Виявлені закономірності зносу алмазних шліфувальних кругів в процесі обробки дозволяють прогнозувати точність параметри виробу, що шліфується. Досліджено вплив технологічних режимів шліфування і умов обробки на питому витрату алмазів. В результаті дослідження отримано функціональна залежність питомої витрати алмазного круга від технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару. Отримана залежність відображає вплив технологічних режимів шліфування і параметрів алмазовмісного шару інструменту на питому витрату. За допомогою цієї залежності можна визначити інтенсивність зносу шліфувального інструменту.

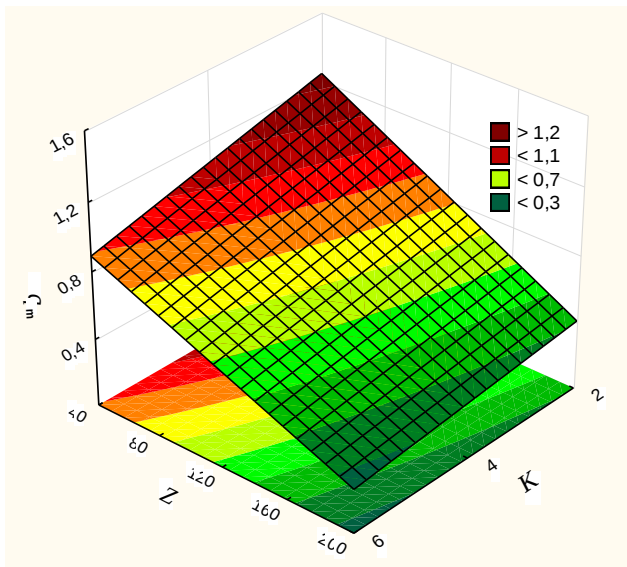


Рис. 5. Поверхня відгуку $q_m - (Z, K)$.
Умови розрахунку: $V_k=25$ м/с, $t=0,025$ мм,
 $V_n=9$ м/хв.

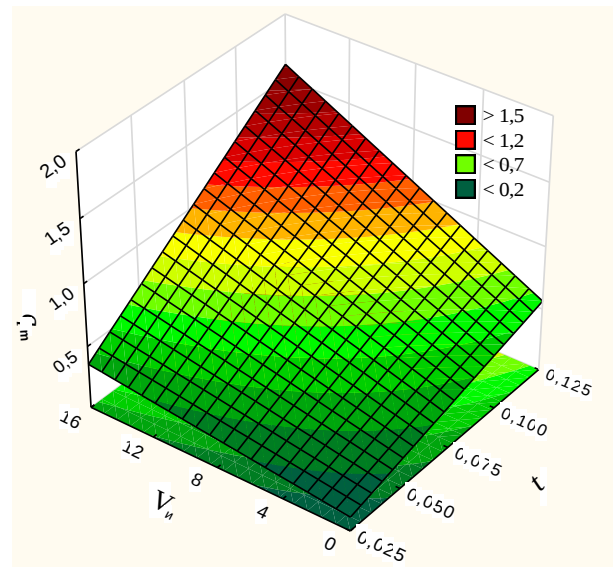


Рис. 6. Поверхня відгуку $q_m - (V_n, t)$.
Умови розрахунку: $K=4$ (100 %),
 $Z=120$ (100/80) мкм, $V_k=25$ м/с

Висновки

Досліджено вплив технологічних режимів шліфування і параметрів алмазовмісного шару інструменту на питому витрату круга. В результаті дослідження отримано функціональну залежність питомої витрати алмазного круга від технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару інструменту. Отримана залежність дозволяє розрахувати питома витрату алмазного круга і визначити необхідний період правки алмазних кругів при обробці виробів складної форми. Дослідження впливу технологічних режимів шліфування і параметрів алмазовмісного шару інструменту підвищують ефективність електроерозійного шліфування. Ефективність процесу шліфування будить забезпечена необхідною точністю обробки виробів складної конфігурації.

References

1. Diamond wheel wear mechanism and its impact on the surface generation in parallel diamond grinding of RB-SiC/Si / Q. Zhang, Q. Zhao, S. To, B. Guo, W. Zhai // *Diamond and Related Materials*. – 2017. – № 74. – P. 16–23. doi:10.1016/j.diamond.2017.01.019
2. Liang Z. Experimental Study on Diamond Wheel V-tip Truing Using a Tangential Grinding Truing Method /Z. Liang // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2018. – № 54(3). – P. 196-202. doi:10.3901/jme.2018.03.196.
3. Зверовщиков В. З. Повышение качественных характеристик поверхности при профильном алмазном шлифовании / В. З. Зверовщиков, А. В. Соколов // *Известия высших учебных заведений. Технические науки*. – 2011. – № 3 (19). – С. 167–174.

4. Bing Guo. On-machine dry electric discharge truing of diamond wheels for micro-structured surfaces grinding / Bing Guo, Qingliang Zhao // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2015. – Vol. 88. – P. 62–70. doi:10.1016/j.ijmachtools.2014.09.011.
5. Study on a 5-axis precision and mirror grinding of glass freeform surface without on-machine wheel-profile truing / Xie Z. J., Deng J.Y., Liao N., Li, H. Zhou, W. X. Ban // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 109. – P. 65-73. doi:10.1016/j.ijmachtools.2016.07.011.
6. Asplund M. Evaluating the measurement capability of a wheel profile measurement system by using GR&R / M. Asplund, J. Lin // *Measurement*. – 2016. – № 92. – P. 19–27. doi:10.1016/j.measurement.2016.05.090.
7. A precision generating grinding method for face gear using CBN wheel[J] / Wang Y, Lan Z, Hou L, et al // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – № 79(9-12). – P. 1839-1848.
8. Márton L. About The Modernized Grinding Wheel Dressingdevice S Diamond-Pin Driving System by The Nilesgear Grinding Machines / L. Márton // *Műszaki Tudományok Közlemények*. – 2018. – № 9(1). – P. 155–158. doi:10.33894/mtk-2018.09.34.
9. Chowdhury M. A. K. Grinding Wheel Surface Topography for Multiple Pass With Incremental Depth of Cut of Rotary Diamond Dresser / M. A. K. Chowdhury // *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Houston, Texas, USA. November 13–19, 2015)*. – 2015. – Vol. 2B. – Access mode :<https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings-abstract/IMECE2015/57366/V02BT02A016/256241>. doi.org/10.1115/IMECE2015-53342.
10. Cheng W. Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding / W. Cheng // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2012. – vol. 31, no. 3. – Pp. 215-224.

References

1. Zhang, Q, Zhao, Q, To, S, Guo, B & Zhai, W 2017, 'Diamond wheel wear mechanism and its impact on the surface generation in parallel diamond grinding of RB-SiC/Si', *Diamond and Related Materials*, no. 74, pp. 16-23.
2. Liang, Z 2018, 'Experimental Study on Diamond Wheel V-tip Truing Using a Tangential Grinding Truing Method', *Journal of Mechanical Engineering*, no. 54 (3), pp. 196.
3. Zverovshnikov, VZ & Sokolov, AV 2011, 'Povyshenie kachestvennyh harakteristik poverhnosti pri profilnom almaznom shlifovanii', *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnicheskie nauki*, no. 3 (19), pp. 167-174.
4. Bing Guo & Qingliang Zhao 2015, 'On-machine dry electric discharge truing of diamond wheels for micro-structured surfaces grinding', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 88, pp. 62-70.
5. Xie, ZJ, Deng, JY, Liao, N, Li, Zhou, H & Ban, WX 2016, 'Study on a 5-axis precision and mirror grinding of glass freeform surface without on-machine wheel-profile truing', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 109, pp. 65-73.
6. Asplund, M & Lin, J 2016, 'Evaluating the measurement capability of a wheel profile measurement system by using GR&R', *Measurement*, no. 92, pp. 19-27.
7. Wang, Y, Lan, Z, Hou, L et al 2015, 'A precision generating grinding method for face gear using CBN wheel[J]', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 79 (9-12), pp. 1839-1848.
8. Márton, L 2018, 'About The Modernized Grinding Wheel Dressingdevice S Diamond-Pin Driving System by The Nilesgear Grinding Machines', *Műszaki Tudományok Közlemények*, no. 9 (1), pp. 155-158.
9. Chowdhury, MAK 2015, 'Grinding Wheel Surface Topography for Multiple Pass With Incremental Depth of Cut of Rotary Diamond Dresser', *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Houston, vol. 2B, viewed 09 October 2020, <<https://doi.org/10.1115/IMECE2015-53342>>.
10. Cheng, W 2012, 'Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding', *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 31, no. 3, pp. 215-224.

Стаття надійшла до редакції 12 жовтня 2020г.

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-45-56

УДК 621.771:006.83

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРЕВЕНТИВНИХ ЗАХОДІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПЛОСКОГО ПРОКАТУ

©Курпе О.Г., Кухар В.В., Присяжний А.Г.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Інформація по авторів:

Курпе Олександр Геннадійович: ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-7239>; aleksandr.kurpe@gmail.com; кандидат технічних наук; старший науковий співробітник кафедри обробки металів тиском; ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна

Кухар Володимир Валентинович: ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>; kvv.mariupol@gmail.com; доктор технічних наук; професор, завідувач кафедри обробки металів тиском; ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна

Присяжний Андрій Григорович: ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8062-075X>; agp87514@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри обробки металів тиском; ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна

В роботі, на підставі поєднання інструментів системи ISO та Lean, запропоновано методологію безперервної оптимізації технології та покращення якості прокату. Запропонована методологія застосовується для продукції яка пройшла стадію освоєння та виробляється в промислових об'ємах, а також може бути використана компаніями-партнерами, що займаються наданням продукції підприємства-виробника додаткової доданої вартості. Для візуальної оцінки стану й визначення рівнів технологічного процесу при встановленні обмежень технологічних параметрів запропоновано застосовувати кольорові маркери. Вдосконалена в роботі методологія керування якістю прокату ґрунтується на використанні циклу Демінга та включає застосування таких інструментів аналізу як діаграми Ішикави, метод Парето, діаграми розподілу та Правила 3σ, контрольні карти Шухарта. Вперше запропоновано диференційовані рішення щодо подальших дій із продукцією, яка вироблена з різним рівнем стабільності технології та якості. Перевірка ефективності даної методології була здійснена на фактичних даних комплексу механічних властивостей листового прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, вироблених по режимах термомеханічної прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ». Виконано порівняльний розрахунок між рівнем якості по фактичних даних та розрахованих по запропонованій методології. Встановлено, що впровадження запропонованої методології дозволить зменшити стандартне відхилення межі плинності, тимчасового опору та відносного подовження дослідного прокату на 44 %, 31 % та 46 % відповідно, що свідчить про загальне підвищення стабільності технології та якості. Запропонована методологія дозволяє забезпечити отримання параметрів якості в межах встановлених нормативними документами, а також дозволяє керувати їх рівнем для отримання кращого економічного результату в межах поєднання систем ISO та Lean.

Ключові слова: якість продукції; система ISO; технологічні параметри; стабільність технології; інструменти Lean

Курпе А.Г., Кухарь В.В., Присяжний А.Г. „Совершенствование превентивных мероприятий для обеспечения стабильности технологии и параметров качества плоского проката“. В работе, на основании объединения инструментов системы ISO и Lean, предложена методология непрерывной оптимизации технологии и улучшения качества проката. Предложенная методология применяется для продукции, которая прошла стадию освоения и производится в промышленных объемах, а также может быть использована компаниями-партнерами, которые дорабатывают продукцию предприятия-производителя с целью приобретения ею дополнительной добавленной стоимости. Для визуальной оценки состояния и определения уровней технологического процесса при установлении ограничений технологических параметров предложено применять цветные маркеры. Усовершенствованная в работе методология управления качеством проката основывается на использовании цикла Деминга и включает применение таких инструментов анализа как диаграмма Исикавы, метод Парето, диаграмма распределения и Правила 3 σ , контрольные карты Шухарта. Впервые предложены дифференцированные решения относительно дальнейших действий с продукцией произведенной с разным уровнем стабильности технологии и качества. Проверка эффективности данной методологии была осуществлена на фактических данных комплекса механических свойств листового проката толщиной 14 мм из стали марки К60, произведенных по режимам термомеханической прокатки на стане 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ». Выполнен сравнительный расчет между уровнем качества по фактическим данным и рассчитанным по предложенной методологии. Установлено, что внедрение предложенной методологии позволит уменьшить стандартное отклонение предела текучести, временного сопротивления и относительного удлинения исследованного проката на 44 %, 31 % и 46 % соответственно, что свидетельствует об общем повышении стабильности технологии и качества. Предложенная методология позволяет обеспечить получение параметров качества в пределах установленных нормативными документами, а также позволяет управлять их уровнем для получения лучшего экономического результата в рамках объединения систем ISO и Lean.

Ключевые слова: качество продукции; система ISO; технологические параметры; стабильность технологии; инструменты Lean

Kurpe O., Kukhar V., Prysazhnyj A. “Improving preventive measures to ensure the stability of technology and quality parameters of flat rolled products”. In the work, on the basis of combining the tools of ISO and Lean systems, the methodology for continuous optimization of the technology and improvement of rolled products quality has been proposed. The proposed methodology is applied to products that have passed the development stage and are produced in industrial volumes, and can also be used by partner companies that modify the products of the manufacturing company in order to acquire additional added value. It is proposed to use colored markers to visually assess the condition and determine the levels of the technological process when establishing the limitations of the technological parameters. The improved rolled products quality management methodology is based on the use of the Deming cycle and includes the use of analysis tools such as the Ishikawa diagram, the Pareto method, the distribution diagram and the 3 σ Rules, and the Shukharts control cards. For the first time, the differentiated solutions have been proposed for further treatment of products manufactured with different levels of technology stability and quality. The effectiveness of this methodology has been verified on the basis of the actual data on the complex of mechanical properties of 14 mm plates made of steel grade K60, produced

according to the thermomechanical rolling regimes at plate mill 3600 of AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS. The comparative calculation has been made between the quality level according to the actual data and the level calculated according to the proposed methodology. It has been established that the introduction of the proposed methodology will reduce the standard deviation of the yield strength, tensile strength and elongation of the investigated rolled products by 44 %, 31 % and 46 %, respectively. This indicates a general increase in the stability of the technology and quality. The proposed methodology allows us to provide quality parameters within the limits established by regulatory documents, and also allows us to control their level to obtain the best economic result within both ISO and Lean systems.

Keywords: product quality; ISO system; technological parameters; technology stability; Lean tools.

Вступ

Якість продукції – це сукупність властивостей, які обумовлюють її придатність задовольнити певні потреби відповідно до призначення. Для повноцінного функціонування та досягнення розвитку підприємства/компанії система якості продукції повинна бути впроваджена на всіх процесних ділянках [1-4], починаючи від постачання сировини і закінчуючи процесами роботи зі споживачами продукції (Клієнтами) [5, 6], а також може бути поєднаною із системою виробництва [7]. Аналіз роботи вітчизняних підприємств показав, що система якості на них функціонує тільки у сфері технології, а використання цієї системи в інших сферах, що взаємодіють з технологією, є формальним. Тому подальше вдосконалення підходів до превентивного керування якістю продукції та їх системне використання на всіх процесних ділянках виробництва є актуальною проблемою.

Аналіз публікацій по темі дослідження

Аналіз даних, опублікованих у роботах [5, 6, 8-10] дозволив зробити висновок про те, що для вирішення зазначеної проблеми поєднання системи якості ISO 9000, ISO 9001 з інструментами системи ощадливого виробництва Lean є ефективним. Система Lean є системою організації і управління розробленням продукції, виробництвом, взаємовідносинами з постачальниками і споживачами, коли продукція виготовляється у точній відповідності із запитами споживачів і з меншими втратами [9, 10]. Зокрема, одним з підходів, який передбачений системою якості ISO 9001 [11, 12] та може бути використаний для розв'язання проблеми, що розглядається, є використання «Ризик-орієнтованого мислення». Сутність його полягає в тому, що та чи інша організація повинна виконати оцінку ризиків, тобто визначити чинники, які можуть спричинити відхилення її процесів та системи управління якістю від запланованих результатів, та розробити дії стосовно ризиків для запобігання отримання небажаних ефектів, ґрунтуючись на наявних даних про вироблену продукцію й показники її якості. При цьому, необхідно планувати, у який спосіб інтегрувати та запроваджувати дії до процесів системи управління якістю організації та оцінювати їх результативність, тобто повинен працювати цикл Демінга, або цикл PDCA – плануй (Plan), роби (Do), перевіряй (Check), впливай (Act).

Серед інструментів системи ощадливого виробництва Lean, які доцільно використовувати в поєднанні з системою якості ISO 9001, можна відзначити наступні [8-10, 13, 14]: а) бенчмаркінг, що полягає у порівнянні показників, результатів, параметрів якості

тощо з аналогічними виробництвами, виробниками з метою пошуку найкращого досвіду; б) діаграму Ішикави, як графічний спосіб дослідження та визначення найбільш суттєвих причинно-наслідкових взаємозв'язків між чинниками та наслідками у проблемі, що досліджується; в) принцип Парето – емпіричне правило, згідно з яким для багатьох явищ 80 % наслідків спричинені 20 % причин. Разом із тим аналіз досвіду роботи металургійних підприємств України, показав, що на них недостатньо повно використовується методологія, яка б ґрунтувалась на поєднанні систем якості ISO та ощадливого виробництва Lean, що ускладнює вдосконалення технології та покращення якості продукції.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є забезпечення необхідних показників якості листової металопродукції (на прикладі товстолистого прокату) на основі поєднання принципів систем ISO та Lean.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні задачі: – вдосконалити методологію оптимізації технології та покращення якості прокату; – виконати оцінку ефективності даної методології для забезпечення необхідних показників фізико-механічних властивостей товстолистого прокату зі сталі марки К60.

Виклад основного змісту дослідження

Вдосконалена в роботі методологія керування якістю прокату ґрунтується на використанні циклу Демінга (цикл PDCA) та включає встановлення, визначення значень технологічних параметрів, які впливають на якість продукції, їх контроль, накопичення, обробку та механізми покращення, рис. 1.

Запропонована методологія застосовується для продукції, яка пройшла стадію освоєння та виробляється в промислових об'ємах, а також може бути використана компаніями-партнерами, що займаються наданням продукції підприємства-виробника додаткової доданої вартості (наприклад, додаткова обробка поверхні прокату).

Для здійснення контролю процесу виробництва та забезпечення якості листового прокату необхідно встановлення та керування відповідними технологічними параметрами. Їх можна встановити за допомогою діаграми Ішикави, а також на основі технологічних інструкцій, документації або літературних даних. При цьому, встановлення технологічних параметрів може бути загалом для комплексу показників якості або для окремих показників (чи груп показників) якості. Також для первинного встановлення параметрів технології може бути використано результати бенчмаркінгу для аналогічних виробництв, якщо такі дані є відкритими.

Перелік технологічних параметрів може бути нескінченно великим, тому, у деяких випадках, необхідно контролювати тільки найбільш значущі з них. Значущі показники, які впливають на якість прокату, можна визначити, наприклад, за допомогою методу Парето.

Після встановлення переліку технологічних параметрів необхідно визначити їх значення, які можуть встановлюватись на підставі аналізу виробництва аналогічної продукції, статистичної обробки наявної інформації, наукових досліджень, по літературних джерелах.



Рис. 1 – Відображення методології керування якістю прокату в циклі PDCA

Для оптимізації технології та підвищення якості прокату необхідне накопичення статистичної інформації та її обробка. Для отримання статистичних даних при виробництві прокату необхідно контролювати значення всіх встановлених технологічних параметрів та зберігати цю інформацію. Зазначені параметри слід об'єднувати з показниками якості продукції за допомогою системи простежування, яка є обов'язковою для сучасного виробництва.

Обробка накопиченої статистичної інформації здійснюється на основі багатофакторного аналізу. Кожен з показників якості прокату повинен аналізуватися окремо або в групі з показниками аналогічного рівня (наприклад, в групу можуть бути об'єднані показники механічних властивостей металу). Першим кроком аналізу отриманих статистичних даних є побудова діаграм розподілу по кожному з показників якості прокату з встановленням, в залежності від процесу, обмежень у відповідності до Правил 3 σ або 6 σ . Встановлені обмеження повинні відповідати наявним нормативним документам або бути більш жорсткими. На другому кроці обробки накопиченої статистичної інформації для кожного з встановлених технологічних параметрів, які впливають на даний показник якості прокату, необхідно побудувати діаграми розподілу та встановити обмеження, які забезпечують отримання продукції необхідної якості. При цьому слід уникати окремого встановлення обмежень для взаємозалежних технологічних параметрів, а також встановлення різних обмежень для одного й того ж технологічного параметра, який впливає на різні показники якості прокату. Для визначення обмежень технологічних параметрів

доцільно використовувати статистичні моделі, які можна побудувати на підставі обробки отриманих масивів даних за допомогою, наприклад, програмних додатків типу Statistica або пакету аналізу Microsoft Excel [15].

Для візуальної оцінки стану й визначення рівнів технологічного процесу при встановленні обмежень технологічних параметрів рекомендується застосовувати кольорові маркери. Зокрема, червоний маркер можна встановлювати, коли технологічний параметр відхиляється від меж, які забезпечують отримання даного показника якості прокату у відповідності зі стандартом (це відповідає порушенню технологічного процесу). Жовтий маркер можливо застосовувати, коли технологічний параметр відхиляється від меж, які забезпечують підвищені вимоги, встановлені в межах керування системою якості, при цьому даний показник якості прокату ще знаходиться у межах відповідності стандарту (це означає, що технологічний процес потребує уваги). Зелений маркер слід використовувати, коли технологічний параметр відповідає межам встановлених (підвищених) вимог до якості прокату, при цьому, технологічний процес є стабільним. Використання цього підходу в межах поєднання систем ISO та Lean дає можливість не тільки стабілізувати технологічний процес та підвищити якість продукції, але й знизити виробничі витрати шляхом застосування обмежень в отриманні надвисоких рівнів показників якості. Наприклад, стабільне отримання на середньому рівні вимог показників механічних властивостей товстолистого прокату для магістральних трубопроводів дозволяє економити мікролегуючі елементи при виплавці сталі.

Для відстеження результату та контролю за дотриманням встановлених обмежень по технологічних параметрах можуть бути використані безпосередній контроль співробітником відділу контролю якості на місці фіксації технологічного параметра, системи візуалізації (контролю) технологічних параметрів або автоматична система контролю технологічного процесу. Також широко застосовуються контрольні карти Шухарта, які являють собою графік зміни параметрів вибірки, зазвичай середнього значення і стандартного відхилення який розраховується в процесі накопичування даних. У разі невідповідності допустимому рівню відхилення технологічним персоналом приймаються рішення щодо забезпечення входження даного технологічного параметра у необхідні межі.

Отримання інформації по відхиленням дозволяє керувати подальшою долею такої продукції відповідно до вимог ISO 9001. Так, продукція, що виробляється партією, для кожної одиниці якої всі показники знаходяться в межах зеленого маркеру, вважається відповідною. Якщо по окремих одиницях партії є показники, які знаходяться в межах жовтого маркеру, то призначається додатковий контроль якості для зазначених одиниць продукції. Продукція з жовтими маркерами вважається відповідною тільки після підтвердження по результатах додаткового контролю. У випадку, коли для окремих одиниць партії є показники, що знаходяться в межах червоного маркеру, продукція, якщо це не узгоджено із Замовником, вважається невідповідною та переводиться в нижчу якість або в брак. Партія прокату може містити набір одиниць продукції з комбінацією будь яких маркерів, якщо це узгоджено із Замовником, або відокремлюватися в різні партії відповідно до маркерів.

Нижче виконана оцінка ефективності запропонованої Методології для встановлення поточного рівня якості та напрямків покращення таких показників якості, як межа плинності σ_T , тимчасовий опір σ_B та відносне подовження δ при виробництві товстолистого прокату зі сталі марки K60, товщиною 14 мм, що вироблявся по режимах термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» (м. Маріуполь).

Перелік технологічних параметрів, які впливають на рівень зазначених показників якості прокату, визначений по практичних даних. Цей перелік включає хімічний склад сталі з такими елементами, які впливають на механічні характеристики металу (С, Мп, Nb, V, Мо, Cr, Ni, Cu), а також температуру початку прокатки в чорновій кліті (ТППч), температуру початку другої стадії прокатки в чорновій кліті, яка обумовлена початком гальмування рекристалізації (ТГР), температуру початку та закінчення прокатки в чистовій кліті (ТПП, ТЗП), температуру металу на початку та закінченні контрольованого охолодження (ТПО, ТЗО) [16-18].

Для визначення технологічних параметрів, які впливають на показники якості, що досліджувались, були побудовані діаграми Парето по кожному показнику. Підставою для побудови діаграм Парето є величина вірогідності апроксимації R^2 та величина коефіцієнта кореляції Пірсона (за модулем), які були отримані при визначенні залежності між кожним показником якості та технологічним параметром. На рис. 2, в якості прикладу, представлені діаграми Парето, які побудовано для межі плинності σ_T . Для масиву даних що використовувався в розрахунках, критичне значення коефіцієнта кореляції Пірсона становить 0,17 для рівня значимості $p = 0,05$ (див. рис. 2, б). Технологічні параметри коефіцієнт кореляції Пірсона яких до відповідного показника якості прокату є меншим за 0,17 не є значимими.

В табл. 1 наведені технологічні параметри, які по результатах статистичної обробки даних встановлені як значимі. Дії щодо вдосконалення технології та підвищення якості прокату розроблялись тільки для значимих технологічних параметрів, а незначимі параметри були залишені на рівні, який встановлено технологічним процесом.

Таблиця 1

Показники, які є значимими при визначенні відповідного параметру якості прокату

Показник	Значення кореляції Пірсона за показниками якості прокату		
	σ_T	σ_B	δ
ТГР	0,316	0,379	-
V	0,236	0,252	-
ТПО	- 0,224	- 0,334	-
Ni	- 0,213	- 0,219	-
Мо	- 0,196	-	-
Cu	- 0,188	- 0,202	-
C	0,178	0,246	-
ТЗО	-	- 0,241	0,412

У відповідності до запропонованої методології керування якістю прокату були також побудовані діаграми розподілу по зазначених показниках якості товстих листів.

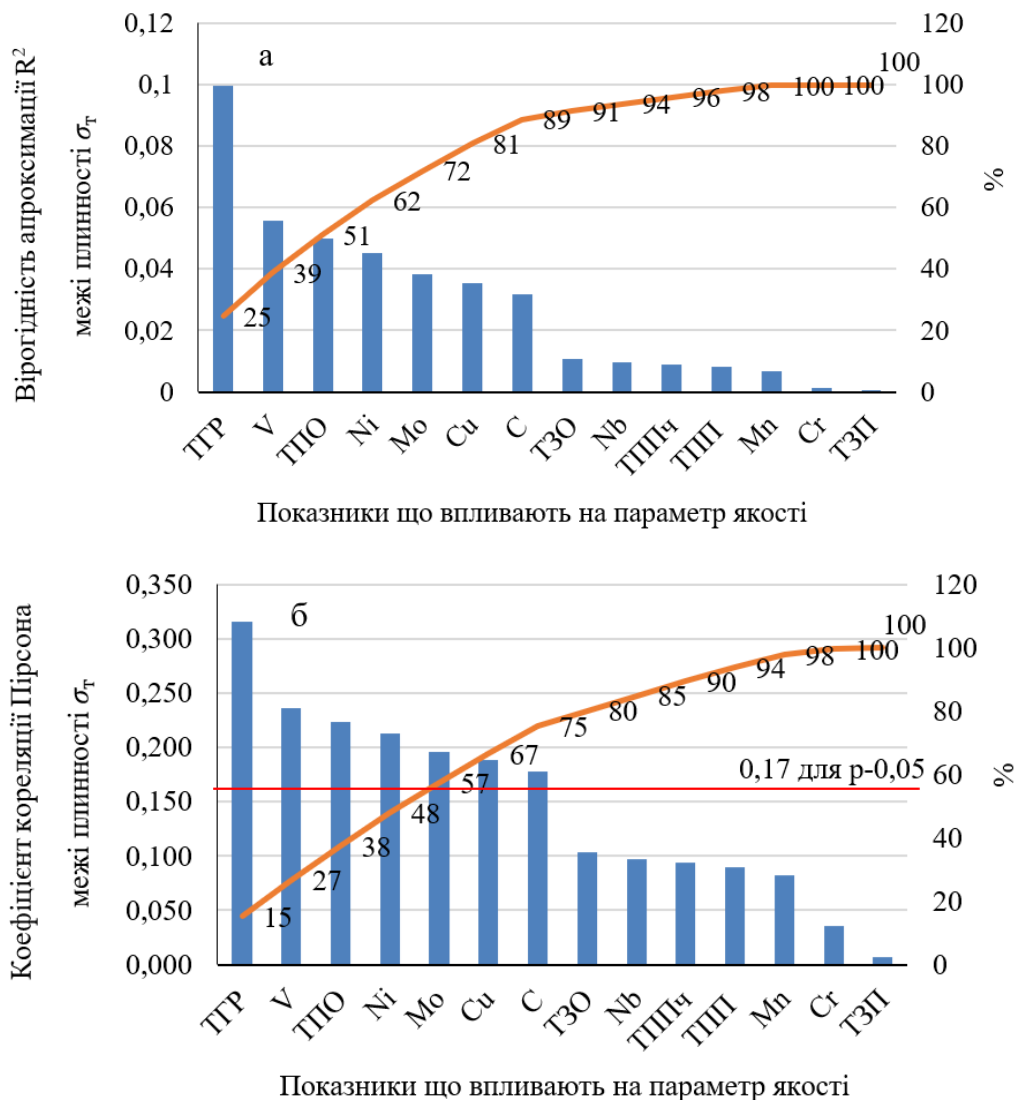
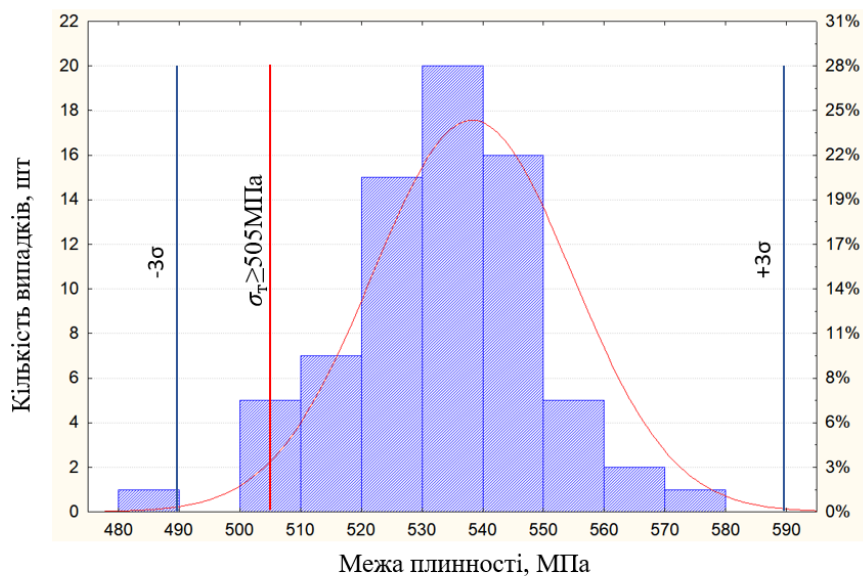


Рис. 2 – Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнта кореляції Пірсона (б) по параметрах, які впливають на межу плинності прокату зі сталі марки К60

На рис. 3 в якості прикладу представлений розподіл межі плинності прокату. Аналіз побудованих діаграм дозволив встановити, що розподіл межі плинності має випадки отримання нижчого за нормативний рівень та граничного з мінімальним нормативним рівнем вимог. По відношенню до розподілу тимчасового опору також є випадки отримання нижчого за нормативний рівень вимог. Розподіл відносного подовження має суттєву кількість випадків отримання нижчого за нормативний рівень вимог, що свідчить про нестабільність технологічного процесу щодо отримання даного показника якості листового металопрокату.

Для стабілізації технології прокатки та підвищення якості прокату по показниках, що досліджувались, були встановлені обмеження та за допомогою кольорових маркерів визначені рівні процесу, представлені в табл. 2.

Для отримання необхідного рівня параметрів технології по встановлених обмеженнях показників якості прокату в масиві даних, що досліджувався, за допомогою фільтрів залишали тільки ті дані, які відповідають стабільному рівню процесу (позначений зеленим маркером у табл. 2), та встановлювали їх межі.



Нормативні параметри	—	$\sigma_T \geq 505 \text{ МПа}$
Статистичні параметри:		середнє значення 537,99 МПа
		стандартне відхилення 16,35 МПа
Розраховані параметри	—	$3\sigma = 489\text{-}587 \text{ МПа}$

Рис. 3 – Початковий розподіл межі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60

Фільтрацію починали з найбільш нестабільного показника якості, яким у даному випадку є відносне подовження. При цьому перелік значимих технологічних параметрів для всіх трьох показників якості листів був однаковий. При встановленні жовтого та червоного маркерів та відповідних до них рівнів технологічного процесу враховували значення кореляції Пірсона по показниках якості прокату (див. табл. 1). Визначення меж порушення технології прокатки (позначені червоним маркером у табл. 2) здійснювали по даним, які відповідають межах нормативних вимог до показників якості товстолистового металопрокату.

Слід зазначити, що важливу роль при використанні запропонованої методології для встановлення рівнів технологічного процесу відіграє якість первинно розробленої (базової) технології.

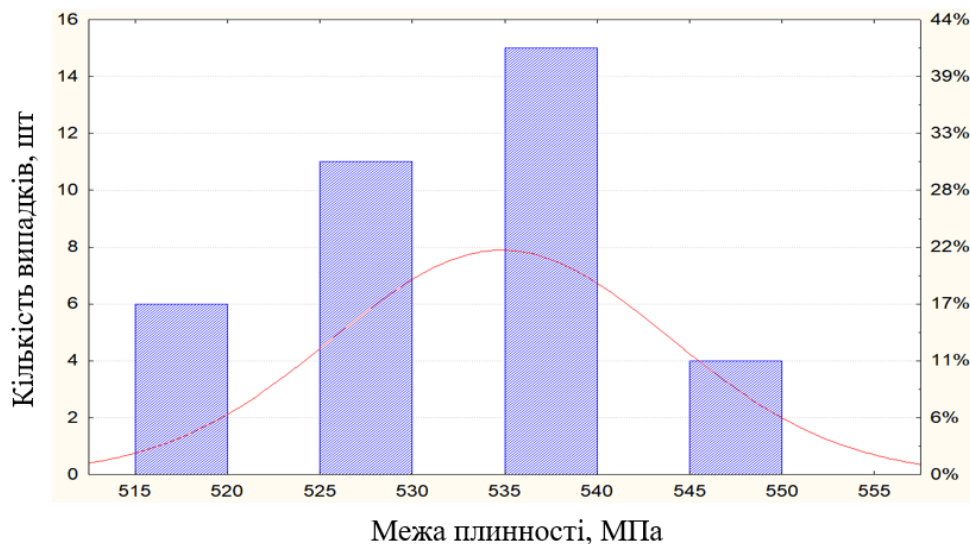
У випадку, що аналізується, був розроблений помилковий базовий технологічний процес термомеханічної прокатки товстих листів, який не дозволив отримати необхідні показники механічних властивостей прокату за допомогою прискореного охолодження, що видно по негативних кореляціях параметрів охолодження. Потрібний рівень властивостей товстих листів досягався здебільшого за допомогою параметрів процесу прокатки.

Після встановлення рівнів технологічних параметрів (див. табл. 2), необхідних для отримання стабільних показників якості товстолистового металопрокату, були побудовані діаграми розподілу межі плинності, тимчасового опору та відносного подовження металу. На рис. 4 в якості прикладу представлена діаграма розподілу межі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60 для зеленого рівня технологічного процесу.

Таблиця 2

Встановлені обмеження технологічних параметрів та показників якості прокату

Показник якості/ технологічний параметр	Рівні процесу				
	порушення процесу	потребує уваги	стабільний	потребує уваги	порушення процесу
Межа плинності, МПа	<505	505–510	511–570	571–580	
Тимчасовий опір, МПа	<590	590–600	600–660	661–710	>710
Відносне подовження, %	<22	22,0–22,4	22,5–25,0	25,1–26,0	
ТТР, °C	<876	876–908	909–1008	-	>1008
V, %	<0,055	0,056– 0,059	0,06–0,08	-	>0,08
ТПО, °C	<717	718–720	721–737	-	>737
Ni, %	-	-	0–0,29	-	>0,29
Mo, %	-	-	0–0,07	-	>0,07
Cu, %	-	-	0–0,28	-	>0,28
C, %	-	-	0,08–0,11	-	>0,11
ТЗО, °C	<541	542–595	596–640	-	>640



Нормативні параметри	—	$\sigma_T \geq 505 \text{ МПа}$
Статистичні параметри:		середнє значення 534,72 МПа стандартне відхилення 9,10 МПа
Розраховані параметри	—	$3\sigma = 507\text{--}562 \text{ МПа}$

Рис. 4 – Розподіл межі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60 для зеленого рівня технологічного процесу

Аналіз отриманих результатів показав, що зелений рівень технологічного процесу забезпечує отримання показників механічних властивостей товстолистого прокату у межах нормативних вимог. При цьому зменшилося стандартне відхилення по межі плинності,

тимчасовому опору та відносному подовженню прокату на 44 %, 31 % та 46 % відповідно, що свідчить про підвищення стабільності технології.

Висновки

Вдосконалена методологія керування якістю продукції та виконана оцінка ефективності її застосування стосовно до умов отримання товстолистого прокату товщиною 14 мм та вище зі сталі категорії міцності K60. Результати цієї оцінки показали, що запропонована Методологія дозволяє забезпечити отримання показників механічних властивостей товстих листів відповідно до вимог, встановлених нормативними документами, а також керувати рівнем даних показників для отримання економічного ефекту в межах поєднання систем ISO та Lean.

Список використаних джерел

1. Johansson C. *Welding Processes Handbook* (Second edition) / Curt Johansson // Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. – 2012. – Pp. 245-258. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857095183.245>
2. Backman J. *Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes: Current State and Future Methods* / Jere Backman, Vesa Kyllönen, Heli Helaakoski // IFAC PapersOnLine. – 2019. – Vol. 52, Iss. 13. – Pp. 1174-1179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.355>
3. Grudzien Łukasz. Information quality in design process documentation of quality management systems / Łukasz Grudzien, Adam Hamrol // *International Journal of Information Management*. – 2016. – **Vol. 36, Iss. 4**. – Pp. 599-606. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.03.011>
4. Hung-Chunga Su. Where in the supply chain network does ISO 9001 improve firm productivity? / Su Hung-Chunga, Kao Ta-Wei, Kevin Linderman // *European Journal of Operational Research*. – 2020. – **Vol. 283, Iss. 2**. – Pp. 530-540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.042>
5. Singh J. P. Modern quality management systems. Woven Terry Fabrics / J.P. Singh, S. Verma // *Manufacturing and Quality Management*. – 2017. – Pp. 179-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100686-3.00012-8>
6. Martínez-Costa Micaela. ISO 9000/1994, ISO 9001/2000 and TQM: The performance debate revisited / Micaela Martínez-Costa, Thomas Y. Choi, Jose A. Martínez, Angel R. Martínez-Lorente // *Journal of Operations Management*. – 2009. – **Vol. 27, Iss. 6**. – Pp. 495-511. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jom.2009.04.002>
7. Antsev V.Yu. Improvement in Production Process for Pipelines Manufacturing Based on Quality Management Method / V.Yu. Antsev, N.A. Vitchuk, V.V. Miroshnikov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – Pp. 950-957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.577>
8. Priede Jānis. Implementation of Quality Management System ISO 9001 in the World and Its Strategic Necessity / Jānis Priede // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. – 2012. – Vol. 58. – Pp. 1466-1475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.1133>
9. Синго С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / С. Синго ; пер. с англ. – М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2010. – 312 с.
10. Оно Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / Т. Оно ; пер. с англ. – М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2013. – 208 с.
11. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів (ISO 9001:2015, IDT) : ДСТУ ISO 9000:2015. – [Чинний від 2016-07-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 45 с.
12. Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT) : ДСТУ ISO 9001:2015. – [Чинний від 2016-07-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 22 с.
13. Воробйова Н. П. Бенчмаркінг як інструмент підвищення конкурентоспроможності організації / Н. П. Воробйова // *Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку*. – 2018. – № 14. – С. 13–20.
14. Статистичний контроль. Контрольні карти Шухарта (ISO 8258:1991, IDT) : ДСТУ ISO 8258-2001. – [Чинний від 2003-07-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – 32 с.
15. Вуколов Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL : учеб. пособие / Э. А. Вуколов. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФОРУМ, 2008. – 464 с.
16. Kurpe O. Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills "1700" / O. Kurpe, V. Kukhar, E. Klimov, S. Chernenko, E. Balalayeva // *The Innovation Exchange : 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing* / Springer Nature Switzerland AG : Ukraine. Luts'k, 2020. – Pp. 418-429. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_42
17. Kurpe O. Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700 / O. Kurpe, V. Kukhar, E. Klimov, A. Prisyazhnyi // *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol. 291. – Pp. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.63>

18. Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600. Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium : collective monograph / O. Kurpe, V. Kukhar. – Poland : Stalowa Wola, 2018. –Vol. 1. – Pp. 281-298.

References

1. Johansson, C 2012, 'Welding Processes Handbook (Second edition)', *Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies*, pp. 245-258, viewed 10.06.2020, <<https://doi.org/10.1533/9780857095183.245>>.
2. Backman, J, Kyllönen, V & Helaakoski, H 2019, 'Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes: Current State and Future Methods', *IFAC PapersOnLine*, vol. 52, iss. 13, pp. 1174-1179, viewed 10.06.2020, <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.355>>.
3. Grudzien, Ł & Hamrol, A 2016, 'Information quality in design process documentation of quality management systems', *International Journal of Information Management*, vol. 36, iss. 4, pp. 599-606, viewed 10.06.2020, <<https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.03.011>>.
4. Hung-Chunga, S, Ta-Wei, K & Linderman, K 2020, 'Where in the supply chain network does ISO 9001 improve firm productivity?', *European Journal of Operational Research*, vol. 283, iss. 2, pp. 530-540, viewed 05.05.2020, <<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.042>>.
5. Singh, JP & Verma, S 2017, 'Modern quality management systems. Woven Terry Fabrics', *Manufacturing and Quality Management*, pp. 179-216, viewed ???, <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100686-3.00012-8>>.
6. Martínez-Costa, M, Choi, TY, Martínez, JA & Martínez-Lorente, AR 2009, 'ISO 9000/1994, ISO 9001/2000 and TQM: The performance debate revisited', *Journal of Operations Management*, vol. 27, iss 6, pp. 495-511, viewed 01.06.2020, <<https://doi.org/10.1016/j.jom.2009.04.002>>.
7. Antsev, VYu, Vitchuk, NA & Miroshnikov, VV 2017, 'Improvement in Production Process for Pipelines Manufacturing Based on Quality Management Method', *Procedia Engineering*, vol. 206, pp. 950-957, viewed 01.06.2020, <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.577>>.
8. Priede, J 2012, 'Implementation of Quality Management System ISO 9001 in the World and Its Strategic Necessity', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 58, pp. 1466-1475, viewed 05.05.2020, <<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.1133>>.
9. Singo, S 2010, *Izuchenie proizvodstvennoj sistemy Tojoty s točki zrenija organizacii proizvodstva*, Institut kompleksnyh strategicheskikh issledovanij, Moskva.
10. Ono, T 2013, *Proizvodstvennaja sistema Tojoty. Uhodja ot massovogo proizvodstva*, Institut kompleksnyh strategicheskikh issledovanij, Moskva.
11. *Sistemy upravlinnja yakistju. Osnovni polozhennja ta slovnyk terminiv (ISO 9001:2015, IDT) : DSTU ISO 9000:2015* 2015, Chynnyj vid 2016-07-01, Derzhavne pidpriemstvo Ukrainyskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakost, Kyiv.
12. *Sistemy upravlinnja yakistju. Vymoghy (ISO 9001:2015, IDT) : DSTU ISO 9001:2015* 2015, Chynnyj vid 2016-07-01, Derzhavne pidpriemstvo Ukrainyskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakost, Kyiv.
13. Vorobjova, NP 2018, 'Benchmarking jak instrument pidvyshhennja konkurentospromozhnosti orghanizaciji', *Problemy innovacijno-investytsijnogho rozvytku*, no. 14, pp. 13-20.
14. *Statystychnyj kontrolj. Kontroljni karty Shukharta (ISO 8258:1991, IDT) : DSTU ISO 8258-2001* 2001, Chynnyj vid 2003-07-01, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, Kyjiv.
15. Vukolov, JeA 2008, *Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniju operacij s ispolzovaniem paketov STATISTICA i EXCEL*, 2nd. edn, FORUM, Moskva.
16. Kurpe, O, Kukhar, V, Klimov, E, Chernenko, S & Balalayeva, E 2020, 'Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills 1700', *The Innovation Exchange : 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing*, Springer Nature Switzerland AG, Lutsk, pp. 418-429, viewed 01 June 2020, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_42>.
17. Kurpe, O, Kukhar, V, Klimov, E & Prysiaznyi, A 2018, 'Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700', *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena*, vol. 291, pp. 63-71, viewed 05 May 2020, <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.63>>.
18. Kurpe, O & Kukhar, V 2018, 'Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600', *Engineering sciences, Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium*, Collective monograph, Stalowa Wola, vol. 1, pp. 281-298.

Стаття надійшла до редакції 15 червня 2020 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-57-64

УДК 621.941.015:681.5

СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЦИФРОВОГО ДРУКУ

© Гордєєв А.С.

*Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця***Інформація про автора**

Гордєєв Андрій Сергійович: ORCID: 0000-0002-9601-6220; gordeew@ukr.net; доктор технічних наук; професор кафедри комп'ютерних систем і технологій; Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, пр-т Науки 9а, м. Харків, Україна

В процесі цифрового друку виникають проблеми технічного регулювання якості продукту, так як існує бар'єр у вигляді несумісних систем в відтворенні кольору на різному обладнанні. Без дотримання визначених умов освітлення, калібрування різноманітних типів пристроїв, профілювання, стандартизації кольору, і десятків інших факторів, що впливають на кінцевий колір продукту, часто неможливо досягти того колірного стандарту, який встановив замовник.

Необхідно дослідження технологій поліграфічних процесів і зокрема цифрового друку. Це необхідно для того, щоб визначити, чи можуть специфікації друку і засоби контролю якості (в тому числі управління кольором) застосовуватися в цифровому друку і, якщо можливо, в якому сегменті. Оскільки колір дуже важливий для друку, особливо в сфері упаковки та маркетингу.

Актуальним стає питання застосування існуючих стандартів в цифровому друку. Хоча цифровий друк вносить структурні зміни в виробничий процес, їй не вистачає стандартизації, в порівнянні, наприклад, з офсетним друком, де за допомогою ISO 12647-2 застосовуються узгоджені цільові значення і керівні принципи.

Мета роботи полягає в огляді сучасних тенденцій стандартизації цифрових методів друку та розробки рекомендацій щодо управління якістю друку пробних відбитків.

Для визначення значущості факторів, що впливають на якість цифрового друку використовувався метод рангової кореляції з розрахунком коефіцієнта конкордації.

В результаті проведеної роботи можна констатувати, що основна концепція ISO 12647-2 повністю підходить для офсетного друку. Однак для цифрового друку вона важко застосовна. Попит на стандарт цифрового друку, поряд з методами контролю процесу і забезпечення якості, очевидна.

Ключові слова: стандартизація, цифровий друк, система менеджменту якості, поліграфія, обладнання, денситометр.

Гордєєв А.С. „Стандартизация технологических процессов цифровой печати“.

При цифровой печати возникают проблемы технического регулирования качества продукта, так как существует барьер в виде несопоставимых систем воспроизведения цвета на различном оборудовании. Без соблюдения определенных условий освещения, калибровки различных типов устройств, профилирования, стандартизации цветов, печатного процесса и десятков других факторов, влияющих на конечный цвет продукта, зачастую не возможно достичь того цветового стандарта, который установил заказчик.

Необходимо исследование технологий, процессов и рабочих полиграфических процессов и в частности цифровой печати. Это необходимо для того, чтобы определить, могут

ли спецификации печати и средства контроля качества (в том числе управление цветом) применяться в цифровой печати и, если возможно, в каком сегменте. Поскольку цвет очень важен для печати, особенно в сфере упаковки и маркетинга, эволюция печати требует согласования цветов в разных технологиях, материалах, материалах и красителях.

Актуальным становится вопрос применения существующих стандартов в цифровой печати. Хотя цифровая печать вносит структурные изменения в производственный рабочий процесс и процессы, ей не хватает стандартизации печати, по сравнению, например, с офсетной печатью, где посредством ISO 12647-2 применяются согласованные целевые значения и руководящие принципы.

Цель работы состоит в обзоре современных тенденций стандартизации цифровых методов печати и разработки рекомендаций по управлению качеством печати пробных оттисков.

Для определения значимости факторов влияющих на качество цифровой печати использовался метод ранговой корреляции с расчетом коэффициента конкордации.

В результате проведенной работы можно констатировать, что основная концепция ISO 12647-2 полностью подходит для офсетной печати. Однако для цифровой печати она трудно применима. Спрос на стандарт цифровой печати, наряду с методами контроля процесса и обеспечения качества, очевиден.

Ключевые слова: стандартизация, цифровая печать, система менеджмента качества, полиграфия, оборудование, денситометр.

Gordeev A. "Standardization of digital printing technological processes".

In digital printing, there are problems of technical regulation of product quality, since there is a barrier in the form of incomparable color reproduction systems on different equipment. Without adhering to certain lighting conditions, calibrating various types of devices, profiling, color standardization, printing process and dozens of other factors that affect the final color of a product, it is often impossible to achieve the color standard that the customer has set.

Research is needed on technologies, processes and printing workflows and in particular digital printing. This is to determine if print specifications and quality controls (including color management) can be applied to digital printing and, if possible, in which segment. Since color is so important in printing, especially in packaging and marketing, the evolution of printing requires color matching across technologies, materials, materials and dyes.

The issue of applying existing standards in digital printing is becoming topical. While digital printing brings structural changes to the manufacturing workflow and processes, it lacks printing standardization, compared to, for example, offset printing, where agreed target values and guidelines are applied through ISO 12647-2.

The purpose of this work is to review current trends in the standardization of digital printing methods and develop recommendations for managing the quality of proof printing.

To determine the significance of factors affecting the quality of digital printing, the rank correlation method was used with the calculation of the concordance coefficient.

As a result of the work carried out, it can be stated that the basic concept of ISO 12647-2 is fully suitable for offset printing. However, it is difficult to apply for digital printing. The demand for a digital printing standard, along with process control and quality assurance methods, is clear.

Keywords: standardization, digital printing, quality management system, printing industry, equipment, densitometer.

Вступ

Розуміння стандартизації завжди зводиться до приведення числових і фізичних показників виробництва до визначеному еталону або рамкам, при виході за які відбувається ухилення від заданого значення, а значить від стандарту якості.

Впровадження СМЯ - системи менеджменту якості - має свої підводні камені. Вони пов'язані як з небажанням підприємств «даремно» витрачати гроші і час на отримання папірця, який навряд чи кардинально змінить якість поліграфічної продукції що випускається, так і з реальною віддачею від отримання сертифікату.

Тут виникають проблеми технічного регулювання якості продукту, так як існує бар'єр у вигляді несумісних систем відтворення кольору на різному обладнанні. Без дотримання визначених умов освітлення, калібрування різних типів пристроїв, профілювання, стандартизації кольорів, друкованого процесу і десятків інших факторів, що впливають на кінцевий колір продукту, не можна досягти того кольорового стандарту, який встановив замовник.

Актуальним стає питання застосування існуючих стандартів в цифровому друку. Хоча цифровий друк вносить структурні зміни в виробничий процес, їй не вистачає стандартизації, в порівнянні, наприклад, з офсетним друком, де за допомогою ISO 12647-2 застосовуються узгоджені цільові значення і керівні принципи. Цей недолік в основному залежить від двох взаємопов'язаних факторів. По-перше, в цифровому друку використовується безліч різних технологій, і кожна з них демонструє істотні відмінності в технології друку, матеріалах для друку, підготовці даних, управлінні процесом і вимогах до якості зображення. По-друге, в порівнянні з традиційною печаткою деякі технології цифрового друку все ще розвиваються. Зрештою, цифровий друк універсальний і варіативний в усіх відношеннях, і його не можна стандартизувати під одним стандартом.

Проблеми стандартизації цифрового друку

Експерт в галузі друкованих ЗМІ Кріс Бейкер, який пропрацював віце-президентом в HP і Indigo протягом п'яти років, прогнозує, що збільшення частки цифровий друк буде продовжуватися і в майбутньому: «Цифровий друк буде всюди в майбутньому. Цифровий друк буде використовуватися не тільки для друку, але і для персоналізації упаковки» [1].

Видавнича індустрія постійно змінюється. На ринок виходять нові революційні технології цифрового друку, стандарти продовжують розвиватися або переглядатися; електронні ЗМІ дозволяють постачальникам послуг друку стати постачальниками послуг зв'язку. Це має на увазі більш складні процеси і пов'язані з ними взаємодії.

Для клієнтів цифрового друкарського обладнання треба знайти компроміс між ціною і якістю. Однак загальна якість цифрових машин - це дуже складна категорія, що включає технічні аспекти, такі як очікуваний термін служби, швидкість друку, допустимі носії, а також такі аспекти, як умови обслуговування. Щоб виявити джерела помилок, які призводять до того, що друкований продукт не відповідає необхідним стандартам якості, потрібні відповідні методи аналізу та спеціальні знання тих, хто експлуатує пристрої [2].

Одним з бар'єрів в стандартизації кольору є величезна кількість самих стандартів (Color Management System) [6]. Це пов'язано з різноманітністю видів друку (глибока, флексографія, висока, офсетна і т.д.). Однак ISO 12647 - 2 все-таки вдалося привести до стандартів ці види друку.

Цей стандарт став настільною книгою для багатьох поліграфічних підприємств. Справа в тому, що стандарт ISO 12647 не просто створив базу стандартів, він ввів поняття про вплив зовнішніх факторів на вимірювання відбитка. Тобто він враховує умови виміру, а саме: під яким джерелом нормованого світла відбувалися вимірювання (5000 K), геометрію приладу вимірювання (спектрофотометра), кут стандартного спостерігача (2°), використання поляризованого фільтра (Pol) і т.п. [5].

Мета роботи полягає в огляді сучасних тенденцій стандартизації цифрових методів друку та розробки рекомендацій щодо управління якістю друку пробних відбитків.

Офсетний стандарт процесу (PSO) і цифровий друк

Оскільки існує безліч різних технологій, процесів і робочих процесів друку, проводиться дослідження, щоб визначити, чи можна застосувати процес управління кольором до цифрового друку і, якщо можливо, до яких додатків цифрового друку. Фізика літографічного процесу не змінюється від однієї моделі або машини до іншої. Але всі виробники цифрових друкованих машин мають унікальні запатентовані процеси.

У цифровому процесі вирішальним фактором якості кольору є гамма - діапазон кольорів, який може відтворити друкарська машина. Чим ширше гамма, тим більше кольорів можна надрукувати. Але гамми однакового розміру не завжди рівні. Один пристрій може бути слабким в червоних тонах, інший - в синьому. Іноді гамма однакового розміру може давати дуже різні результати.

Зазвичай цифрові друкарські машини мають більш широку кольірну гамму, ніж офсетний друк (рис.1) [3]. Оскільки діапазон зсуву як і раніше є стандартом в умах багатьох людей, це часто незрозуміло, і це ще більше збиває з пантелику. На відміну від офсетного, кожна модель цифрової друкарської машини має різну кольорову гамму. Все відрізняється від офсетних. І це ще складніше, якщо врахувати відтворення плашечних кольорів, а не тільки звичайні кольори СМΥК. Існує також думка, що через величезну діапазону додатків, що є одним з ключових переваг цифрового друку, також ускладнюється стандартизація.

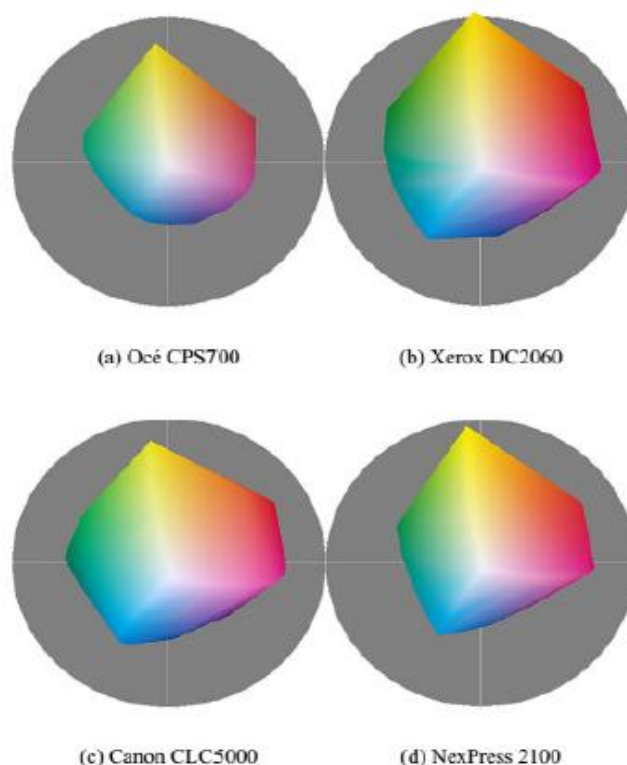


Рис. 1 – Різні цифрові друкарські машини, різні кольорові гамми

Офсетний стандарт процесу (PSO) був розроблений Fogra у співпраці з Федерацією поліграфічної та медіаіндустрії Німеччини. Це опис промислово орієнтованої і стандартизованої процедури створення поліграфічної продукції. PSO відповідає міжнародній серії стандартизації ISO 12647 та, отже, визнаний у всьому світі [3].

Використовуючи PSO, можна гарантувати якість виготовлення всього друкованого продукту, від створення макету до готового виробу. PSO описує відповідні кошти тестування і методи контролю, за допомогою яких можна контролювати, направляти і підтверджувати виробничий процес. Сюди входять вимірювальні пристрої зі спектральними і денситометричними настройками, а також відповідні тестові елементи (наприклад, тест-смужки). Крім того, PSO встановлює номінальні значення і допуски для друкованої продукції, яка відповідно до сучасних виробничих матеріалами представляє те, що є розумним і здійсненним.

Мета полягає в тому, щоб забезпечити максимальну ефективність виробничого процесу і в той же час гарантувати, що проміжні та кінцеві результати показують передбачувану якість кольору. У поліграфічній галузі дані друкуються дуже рідко там, де вони були створені. Замовники часто доручають роботу різних фахівців в області друку і ЗМІ.

Ця тенденція збережеться, і буде поширюватися і далі. PSO і ISO 12647 знаходяться в постійному розвитку. Таким чином, якість стає вимірним і відтвореним. ISO 12647-2 є частиною ISO 12647, який складається з наступних частин:

ISO 12647-1 - Частина 1 Параметри та методи вимірювання

ISO 12647-2 - Частина 2 Стандартизований офсетний друк

ISO 12647-3 - Частина 3 Стандартизована друкарська машина

ISO 12647-4 - Частина 4 Стандартизований глибокий друк

ISO 12647-5 - Частина 5 Стандартизований трафаретний друк

ISO 12647-6 - Частина 6 Стандартизована флексопечать

ISO 12647-7 - Частина 7 Стандартизований цифровий друк

На жаль, частина 7 стосується не цифровий поліграфічної продукції, а тільки пробних відбитків, які друкуються на цифрових принтерах.

Поява такого стандарту, як ISO 12647, конечно, багато в чому сприяло розвитку процесу стандартизації поліграфічних процесів, але також не можна забувати, що сприйняття кольору дуже суб'єктивний параметр. Тому на поліграфічних підприємствах часто при ходиться відходити від стандартів на догоду вимогам замовника, так як він єдиний критерій якості під час оцінки кольору продукції на виході [4]. І відхід від стандартів не завжди є показником не якісної роботи підприємства.

Формулювання вимог для включення їх до стандарту цифрового друку

Детально вивчивши зміст стандарту ISO 12647-2, нами було визначено, що в стандарті немає не тільки вимог, але навіть рекомендацій із щільності друку. Зате є вимоги по колористиці тріадних фарб (тобто їхніх координатах у системі CIE Lab). Але друкар вимірює щільність плашок на шкалах за допомогою денситометра, і йому відразу ясно, як регулювати подачу фарби в даному секторі. Але навіть якщо в друкарні є спектрофотометр і друкар бачить координати кольорів в CIE Lab, те йому не зрозуміло як реагувати. До того ж через те, що реальні фарби й матеріали відрізняються від «стандартних», шуканий результат може бути не досягнутий ніколи.

В роботі для рішення проблеми адаптації стандарту до цифрового друку, експертам було запропоновано переглянути фактори, що впливають на якість відбитка. У таблиці 1 показана преамбула розрахунку.

Всі експерти розташували фактори в строгій послідовності, не прибігаючи до прийому стирання границі між рівнозначними факторами. Для визначення ступеня погодженості думок експертів використовується обчислення коефіцієнта конкордації. отриманий коефіцієнт конкордації $W=0,544$ для 1%- рівня вірогідності вказує на те, що існує не випадкова погодженість у думках чотирьох дослідників. Одержання цього результату дозволяє побудувати середню апіорну діаграму рангів (рис.2).

Таблиця 1

Експертна інформація у вигляді чотирьох нескладних ранжировок

Вихідні дані	
X1	Оптична щільність плашок
X2	Колориметричні координати
X3	Баланс «по сірому»
X4	Лініатура растра
X5	Тоновий приріст (розтискування)

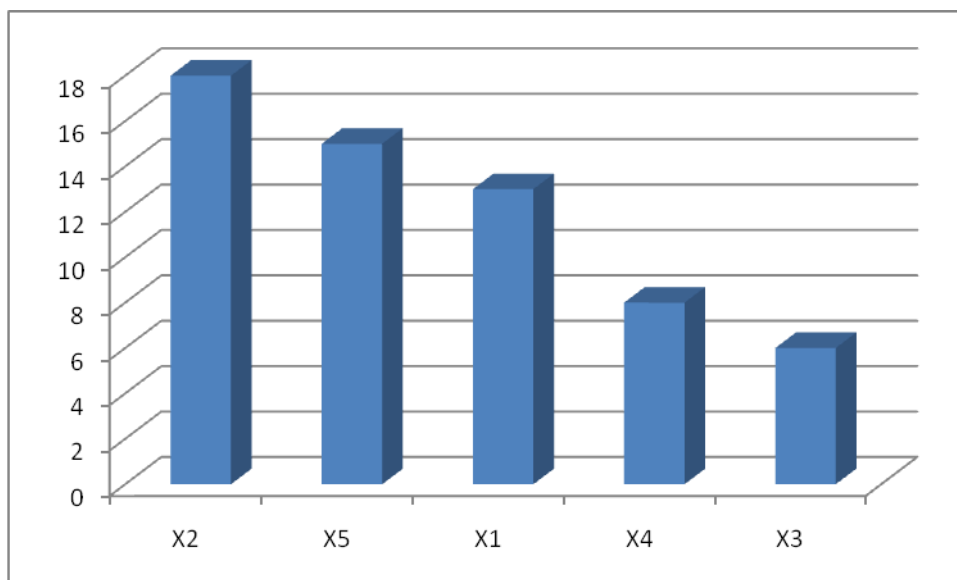


Рис. 2 – Середня апіорна діаграма рангів

Запропонований підхід, коли спочатку технолог за допомогою спектрофотометрамагається правильних кольорів і фіксує відповідні значення оптичної щільності на відбиття елементів контрольної шкали із суцільним барвистим шаром. Потім друкар стежить за їхньою сталістю за допомогою денситометра. У роботі визначені допуски на варіацію значень денситометричних густин на відбиття кольорових плашок (табл.2).

Таблиця 2

Допуски значень денситометричних густин на відбиття для плашечних кольорів

Тип паперу	Кольори			
	Блакитний	Пурпурний	Жовтий	Чорний
Глянцевий без деревної маси (від 70 г/м ² і вище)	0,11	0,11	0,1	0,1
Матовий без деревної маси	0,09	0,09	0,09	0,09
Глянцевий, рулонний	0,14	0,14	0,18	0,14
Некрейдований (офсетний)	0,1	0,1	0,11	0,1
Некрейдований (газетний, супер-каландрований)	0,15	0,19	0,26	0,17
Виміри здійснюються: чорна підкладка, джерело висвітлення D50,2 ^{об} огляди 0/45 або 45/0.				

Також було визначено, що якщо друкувати в припустимих стандартом межах відхилення щільності фарби й розтискування, то на границях межі різниця в кольорі досить відчутна. Тому в даній роботі були змінені допуски цих значень (табл.3).

Таблиця 3

Допуск на тонове збільшення й максимальний спред півтону для кольорпроби

Тонові градації контрольного поля	Допуск на відхилення (кольоропроба)	Допуск на відхилення (Ок-аркуш)	Допуск на відхилення (тиражна продукція)
40 або 50%	1,5	2	2
75 або 80%	1	1,	1,5
Максимальний спред півтону	2	2,5	2,5

Висновки

Підводячи підсумок, можна сказати, що основна концепція ISO 12647-2 повністю підходить для офсетного друку. Навпаки, цифровий друк з урахуванням конкретних технологій важко собі уявити. Замість цього здається більш придатною концепція, незалежна від процесу, яка звертається до окремих програм зі спеціальними показниками якості друку. Попит на стандарт цифрового друку, поряд з методами контролю процесу і забезпечення якості, очевидна.

Розроблені рекомендації з допусків значень денситометричних густин на відбитки для плашечних кольорів, які дозволяють більш об'єктивно керувати якістю пробних і тиражних відбитків. Практична значимість результатів роботи полягає у тому, що розроблені рекомендації можливо застосовувати в цифровому друку для виготовлення кольоропроб и друкуванню тиражу.

Список використаних джерел

1. History of Digital Print [Electronic resource]. – URL : <https://www.printed.com/history-of-digital-print> (last request: 2020-12-06).
2. Höchstes gerätetechnisches Niveau [Electronic resource]. – URL : <https://fogra.org/pruefen/ laborausstattung> (last request: 2020-12-06).
3. Trochoutsos Ch. Developments in digital print standardization [Electronic resource] / Ch. Trochoutsos, A. Politis. – URL : <https://doi.org/10.24867/GRID-2018-p58> (last request: 2020-12-01).
4. Саблина Н. В. Проблемы внедрения стандартизации и технического регулирования в полиграфии Н. В. Саблина // Журнал правовых и экономических исследований. – 2013. – № 4. – С. 268–271.
5. Hardeberg J. Y. Comparing color image quality of four digital presses [Electronic resource] / J. Y. Hardeberg, S. E. Skarsbø. – URL : http://www.ansatt.hig.no/jonh/archive/ipgac02_iq.pdf (last request: 2020-12-02).
6. Шадрин А. Color Management System (CMS) в логике цветовых координатных систем [Electronic resource] / А. Шадрин, А. Френкель. – URL : <http://www.darkroomphoto.ru/stati/tsvet-i-kolorimetriya/color-management-system-cms-v-logike-tsvetovyih-koordinatnyih-sistem.-chast-i.html> (last request: 2020-11-20)

References

1. History of Digital Print n.d., viewed 06 February 2020, <<https://www.printed.com/history-of-digital-print>>.
2. Höchstes gerätetechnisches Niveau n.d., viewed 06 February 2020, <<https://fogra.org/pruefen/ laborausstattung>>.
3. Christos Trochoutsos, Anastasios Politis. Developments in digital print standardization n.d., viewed 01 February 2020, <<https://doi.org/10.24867/GRID-2018-p58>>.
4. Sablina, NV 2013, ‘Problemy vnedreniya standartizatsii i tehnikeskogo regulirovaniya v poligrafii’, *Zhurnal pravovyh i jekonomicheskikh issledovanij*, no. 4, pp. 268-271.
5. Hardeberg, JY & Skarsbø, SE n.d., *Comparing color image quality of four digital presses*, viewed 02 February 2020, <http://www.ansatt.hig.no/jonh/archive/ipgac02_iq.pdf>.
6. Shadrin, A & Frenkel, A n.d., *Color Management System (CMS) v logike cvetovyh koordinatnyh system*, viewed 11 November 2020, <<http://www.darkroomphoto.ru/stati/tsvet-i-kolorimetriya/color-management-system-cms-v-logike-tsvetovyih-koordinatnyih-sistem.-chast-i.html>>.

Стаття надійшла до редакції 07 грудня 2020 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-65-72

УДК 621.791.042

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ З ОСНОВНИМ ВИДОМ ПОКРИТТЯ

© Ізотова К.О.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Ізотова Катерина Олександрівна: ORCID 0000-0002-6585-6681; itmzv@uipa.edu.ua; кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна

Метою розробки є підвищення продуктивності і зварювально-технологічних властивостей електродів з основним покриттям, за рахунок використання залізного порошку в якості дешевого і ефективного наповнювача при зварюванні плавленням.

Розроблено методику розрахунку показників продуктивності, що дозволяє визначити коефіцієнти наплавлення, розплавлення і інші параметри електродів з залізним порошком в покритті, в залежності від вмісту залізного порошку в покритті і режиму зварювання.

Встановлено, що продуктивність розплавлення електрода в значній мірі залежить від співвідношення основних компонентів в покритті. Було визначено, що наявність в покриттях однойменних компонентів, але взятих в різних співвідношеннях, не визначає однакові зварювально-технологічні властивості електродів.

При наявності в покритті більше 50% залізного порошку різко змінюються його теплофізичні властивості, в зв'язку з чим інакше, ніж в розглянутих вище двох випадках, змінюються характеристики плавлення електродів.

Максимальне значення коефіцієнтів наплавлення і розплавлення отримані при 80% залізного порошку в покритті близько 15 г/Агод.

Розроблено електроди з основним покриттям і залізним порошком на базі мінеральної сировини в Україні, що володіють підвищеними зварювально-технологічними властивостями і коефіцієнтом наплавлення до 15 г/Агод.

Ключові слова: електрод, залізний порошок, зварювання, продуктивність, коефіцієнт наплавлення.

Ізотова Е.А. „Повышение производительности электродов с основным видом покрытия“.

Целью разработки является повышение производительности и сварочно-технологических свойств электродов с основным покрытием, за счет использования железного порошка в качестве дешевого и эффективного наполнителя при сварке плавлением.

Разработана методика расчета показателей производительности, позволяет определить коэффициенты наплавки, расплавления и другие параметры электродов с железным порошком в покрытии, в зависимости от содержания железного порошка в покрытии и режима сварки.

Установлено, что производительность расплавления электрода в значительной степени зависит от соотношения основных компонентов в покрытии. Было определено, что наличие в покрытиях одноименных компонентов, но взятых в разных соотношениях, не определяет одинаковые сварочно-технологические свойства электродов.

При наличии в покрытии более 50 % железного порошка резко изменяются его теплофизические свойства, в связи с чем иначе, чем в рассмотренных выше двух случаях, изменяются характеристики плавления электродов.

Максимальное значение коэффициентов наплавки и расплавления получены при 80 % железного порошка в покрытии порядка 15 г/Ач

Разработаны электроды с основным покрытием и железным порошком на базе минерального сырья Украины, обладающие повышенными сварочно-технологическими свойствами и коэффициентом наплавки до 15 г/Ач.

Ключевые слова: электрод, железный порошок, сварка, производительность, коэффициент наплавки.

Izotova K. "Improving the performance of electrodes with the main type of coating."

The purpose of the development is to increase the productivity and welding-technological properties of electrodes with a basic coating by using iron powder as a cheap and effective filler in fusion welding.

A method for calculating performance indicators has been developed, which makes it possible to determine the coefficients of surfacing, melting and other parameters of electrodes with iron powder in the coating, depending on the content of iron powder in the coating and the welding mode.

It has been found that the productivity of electrode melting largely depends on the ratio of the main components in the coating. It was determined that the presence of the same components in the coatings, but taken in different ratios, does not determine the same welding and technological properties of the electrodes.

In the presence of more than 50% of iron powder in the coating, its thermophysical properties change sharply, and therefore, differently than in the two cases considered above, the melting characteristics of the electrodes change.

The maximum values of the deposition and melting coefficients were obtained at 80% of iron powder in the coating of about 15 g / Ah.

Electrodes with a basic coating and iron powder on the basis of mineral raw materials of Ukraine have been developed, which have increased welding and technological properties and a deposition rate of up to 15 g / Ah.

Keywords: electrode, iron powder, welding, productivity, deposition rate.

Постановка проблеми

В останні роки в Україні і за кордоном широко застосовуються електроди з залізним порошком в покритті, що забезпечують підвищену продуктивність ручного дугового зварювання. Завдяки наявності залізного порошку в покритті і ретельно підібраному складу покриття подібні електроди володіють досить хорошими зварювально-технологічними властивостями [1,2].

Метою даної роботи є розробка нових високопродуктивних електродів з фтористо-кальцієвим покриттям типу Е50А для зварювання відповідальних конструкцій з вуглецевих сталей на постійному і змінному струмі, що забезпечують коефіцієнт наплавлення не менше 14 г/Агод.

Починаючи з 1947 р, приділяється велика увага створенню електродів з залізним порошком в покритті [3,4]. Основою для розробки електродів з підвищеною продуктивністю

служили відомі покриття ОММ-5, ЦМ-7, МР-3, АНО-4, АНО-13 і ін. Слід зазначити, що до високопродуктивних електродів з залізним порошком виявили значний інтерес і за кордоном [6,7].

В літературі [1-5] є дані, згідно з якими наявність більше 50% залізного порошку в покритті різних типів зварювальних електродів є оптимальною кількістю.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

Розробка складу покриття високопродуктивних електродів. Дослідження характеристик розплавлення дослідних електродів. Дослідження впливу хімічного і гранулометричного складу залізного порошку на технологічні характеристики електродів. Вивчення впливу енергетичних параметрів дуги на коефіцієнт наплавлення.

Методологія дослідження

Для виготовлення дослідних партій використовували прес промислового виготовлення. Стрижні електродів виготовляли зі сталевого зварювального дроту марки Св-08А по ГОСТ 2246 діаметром 5 і 6 мм.

Застосовували покриття електродів основного виду, основу якого становить мінерал – мармур CaCO_3 , по ГОСТ 4416. Як розкислювач металу шва застосовували феромарганець марки ФМн 1,0 по ГОСТ 4755 і феросиліцій марки Си-45 по ГОСТ 1415. В якості наповнювача використовували залізний порошок марки ПЖ1 по ГОСТ 9849 (табл.1).

Коефіцієнт ваги покриття електродів становив 147-175% при товщині покриття на сторону 2,7-3,0 мм електродів діаметром 5 мм, і 3,0-3,6 мм - електродів діаметром 6 мм. Автоматичне визначення коефіцієнта маси покриття проводили за допомогою приладу БІА-100.

Наявність залізного порошку в покритті зумовило деякі зміни загальноприйнятої методики визначення характеристик плавлення електродів. Замість одного коефіцієнта розплавлення нами введені два коефіцієнта розплавлення стрижня α_{pc} і коефіцієнт розплавлення електрода α_{pe} . Коефіцієнт розплавлення стрижня визначається як коефіцієнт розплавлення електродів, покриття яких не містить залізного порошку.

Таблиця 1

Склад покриття дослідних електродів, мас. %

Найменування компонентів	Варіанти складу покриття			
	1	2	3	4
Мармур	33,5	22,5	17	7,1
Плашковий шпат	16,5	11,5	8,5	3,4
Феросиліцій	6,6	6,6	4	4
Рутил	4	5	2	2
Поташ	2	2	2	2
Залізний порошок	35	50	65	80
Феромарганець	2,4	2,4	1,5	1,5

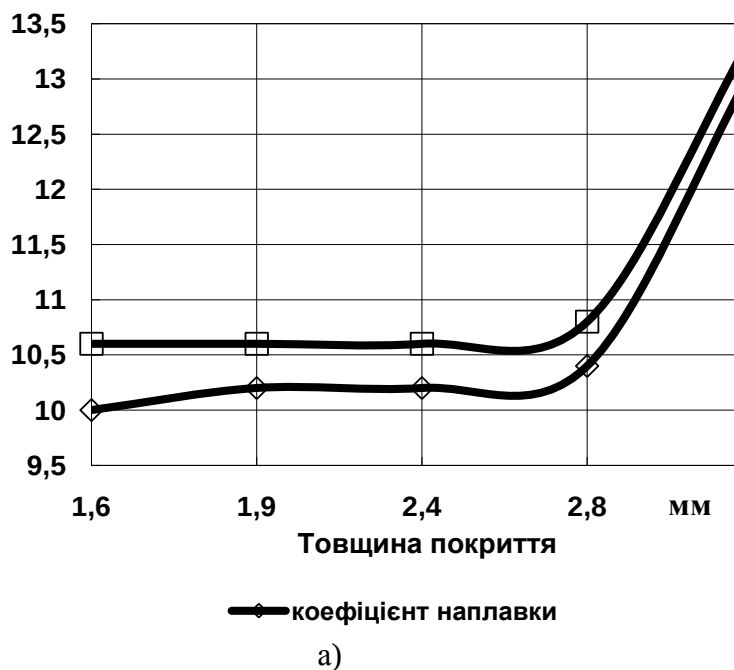
Результати досліджень

При вивченні різних металургійних систем було встановлено, що продуктивність розплавлення електрода в значній мірі залежить від співвідношення основних компонентів в покритті. Було визначено, що наявність в покриттях однойменних компонентів, але взятих в

різних співвідношеннях, не визначає однакові зварювально-технологічні властивості електродів (рис. 1, 2).

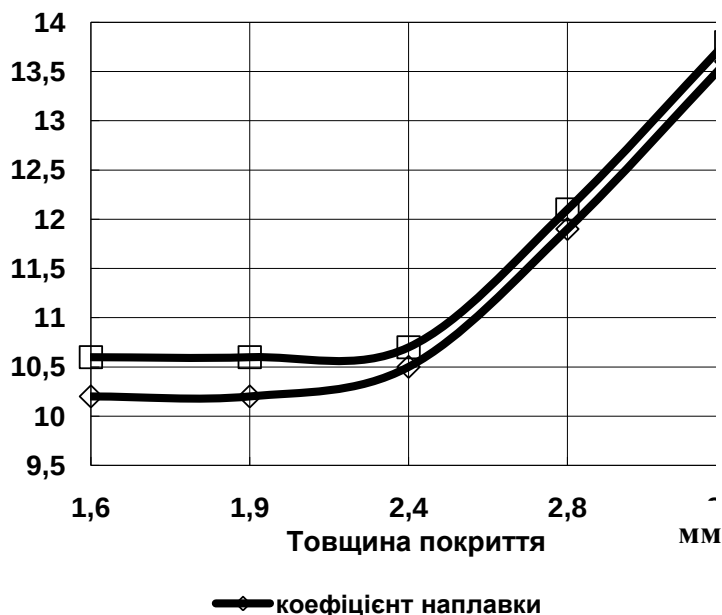
При утриманні 35% залізного порошку в покритті помітне підвищення коефіцієнта наплавлення і розплавлення спостерігається лише при відношенні $G_{з.п.}/G_{ст}$ більше 0,35. Швидкість плавлення і коефіцієнт розплавлення стрижня зменшуються в міру збільшення відношення $G_{з.п.}/G_{ст}$, або товщини покриття. Аналогічні залежності спостерігаються і для варіантів з вмістом залізного порошку відповідно 50; 65 і 80%. Зі збільшенням відношення $G_{ж.п.}/G_{ст}$, або товщини покриття спостерігається з одного боку, закономірне зниження швидкості плавлення електрода і коефіцієнта розплавлення стрижня, а з іншого - підвищення коефіцієнтів наплавлення і розплавлення електрода.

α_n, α_p г/Агод



а)

α_n, α_p г/Агод



б)

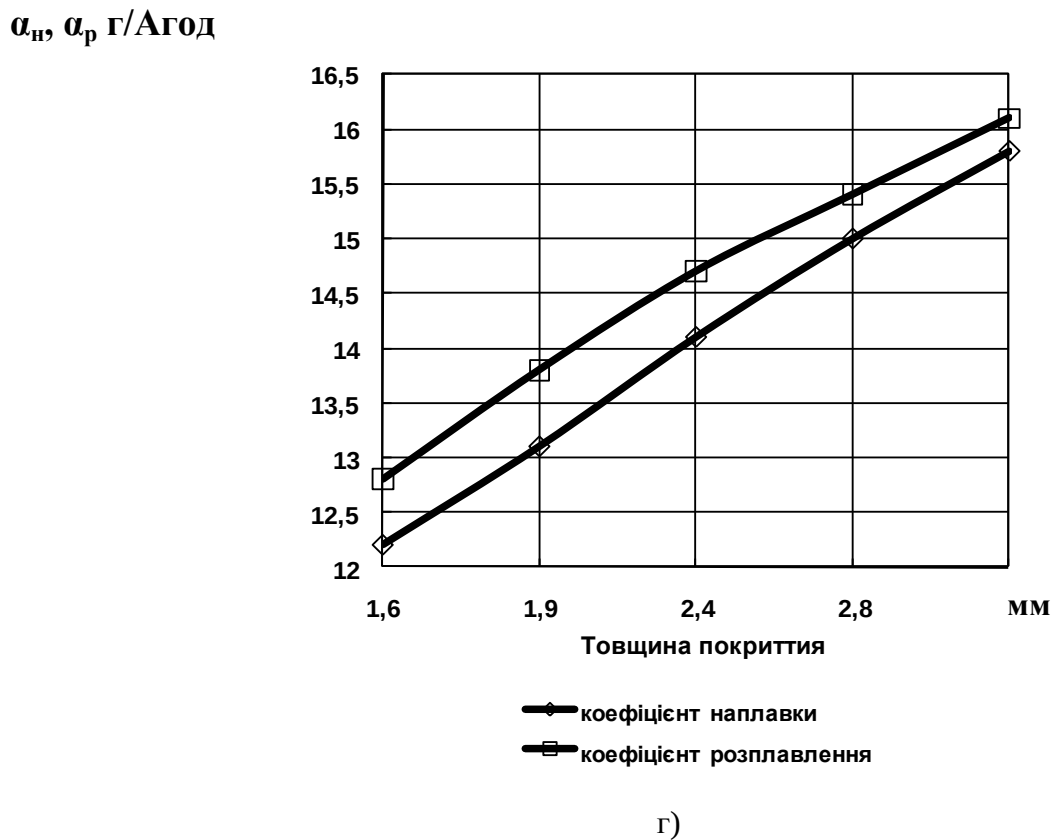
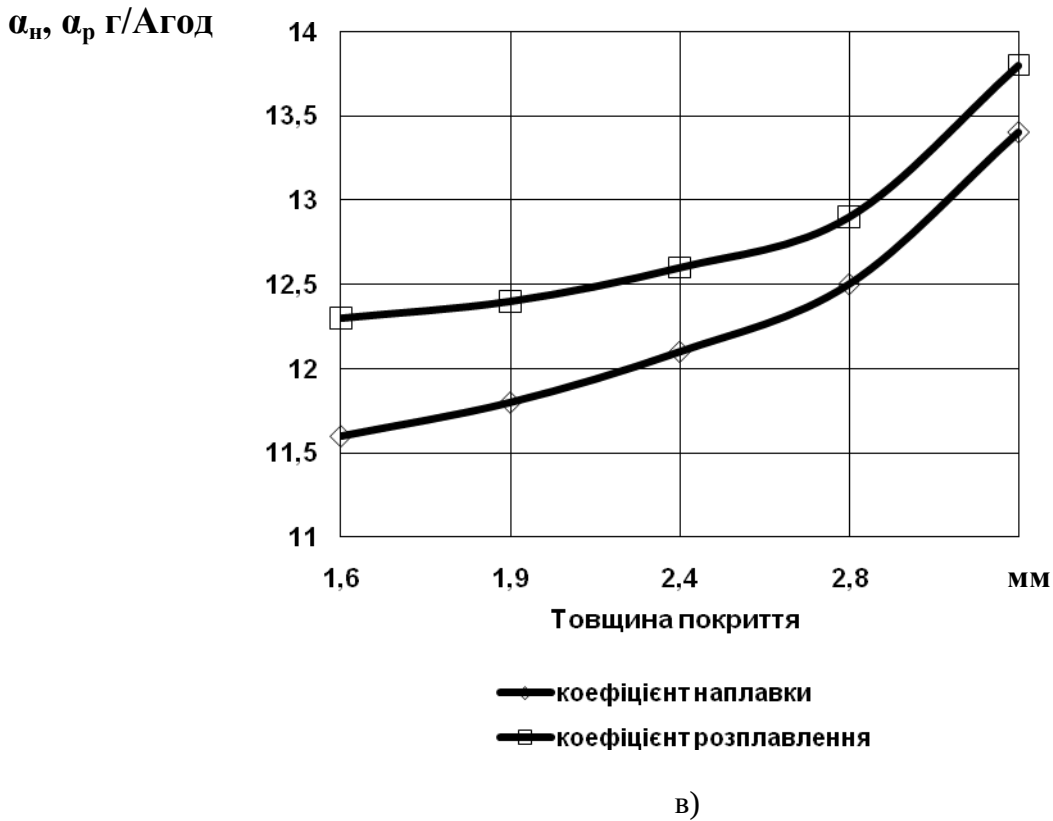


Рис. 1 – Зміна характеристик плавлення електродів з різною кількістю залізного порошку:
а - 35 %; б - 50 %; в - 65 %; г - 80 %

$V_{пл}$, см/хв

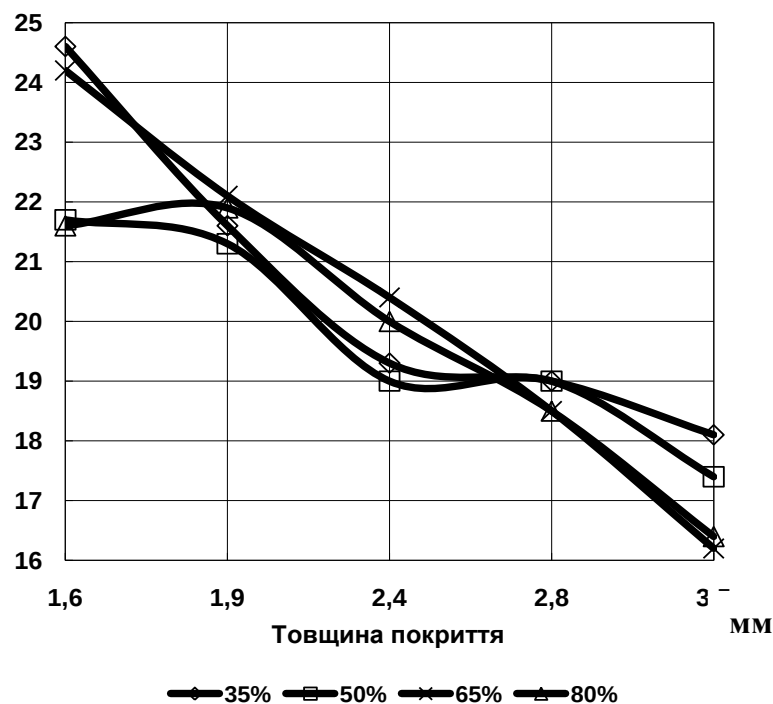


Рис. 2 - Зміна швидкості плавлення електродів з різною кількістю залізного порошку і товщиною покриття

Коефіцієнти плавлення стрижня і розплавлення електрода з покриттям, що містить 65 і 80% залізного порошку, плавно змінюються зі збільшенням товщини покриття; при цьому швидкість плавлення електрода також змінюється без різких коливань.

Можна вважати, що при наявності в покритті більше 50% залізного порошку різко змінюються його теплофізичні властивості, в зв'язку з чим інакше, ніж в розглянутих вище двох випадках, змінюються характеристики плавлення електродів.

Максимальне значення коефіцієнтів наплавлення і розплавлення отримані при 80% залізного порошку в покритті близько 15 г/Агод, але при цьому зварювально-технологічні властивості електродів помітно погіршилися.

Ці досліді показали, що тільки за рахунок введення залізного порошку в покриття можна отримати високопродуктивні електроди з коефіцієнтом наплавлення вище 14-15 г/Ач.

У той же час відомо, що зерновий склад залізного порошку так само робить істотний вплив на характеристики плавлення електродів.

З таблиці 3 видно вплив розміру частинок залізного порошку на характеристики плавлення електродів. Для цього взяли електроди з товщиною покриття на сторону 2,7 мм, щоб зберегти однакову кількість залізного порошку - 50%.

На рис. 3 в вигляді діаграми зображені характеристики плавлення електродів за даними таблиці 2. Коефіцієнт наплавлення електродів, в покриття яких введено залізний порошок з розміром частинок менше 0,056мм, становить близько 11 г/Агод.

Зі збільшенням розміру часток залізного порошку помітно зростають швидкість плавлення, а також підвищуються коефіцієнти наплавлення і розплавлення електрода.

Введення залізного порошку з розмірами частинок 0,45-0,63 мм дозволило підвищити коефіцієнт наплавлення до 17 г/Ач.

Порівнюючи дослід 1 з дослідом 4 (див. таблицю 2.) в яких використаний дрібний і великий залізний порошок відповідно можна помітити, що значення показників плавлення електродів зросли більш ніж в 1,5 рази.

Описаний дослід показав ще один шлях підвищення продуктивності розплавлення при розробці нових електродів.

Таблиця 2

Характеристики плавлення електродів з 50% залізного порошку різного зернового складу

№ Дослід	Розмір часток залізного порошку	Коеф. маси покриття в %	$G_{з.п.}/G_{ст}$	Коефіцієнти				Швидк. плавлен. електр. в см/хв.
				розпл. стриж. в г/Агод	наплав. в г/Агод	розплав електр. в г/Агод	втрат в %	
1	< 0,056	102	0,47	7,8	10,6	11,5	8,6	18,9
2	0,14-0,22	102	0,47	8,3	11,4	12,6	9,3	20,3
3	0,35-0,45	107	0,48	9,7	13,7	14,8	8,1	23,5
4	0,45-0,63	101	0,47	12,0	17,1	18,2	6,0	31,8

$a_n, a_p, \text{ г/Агод}$

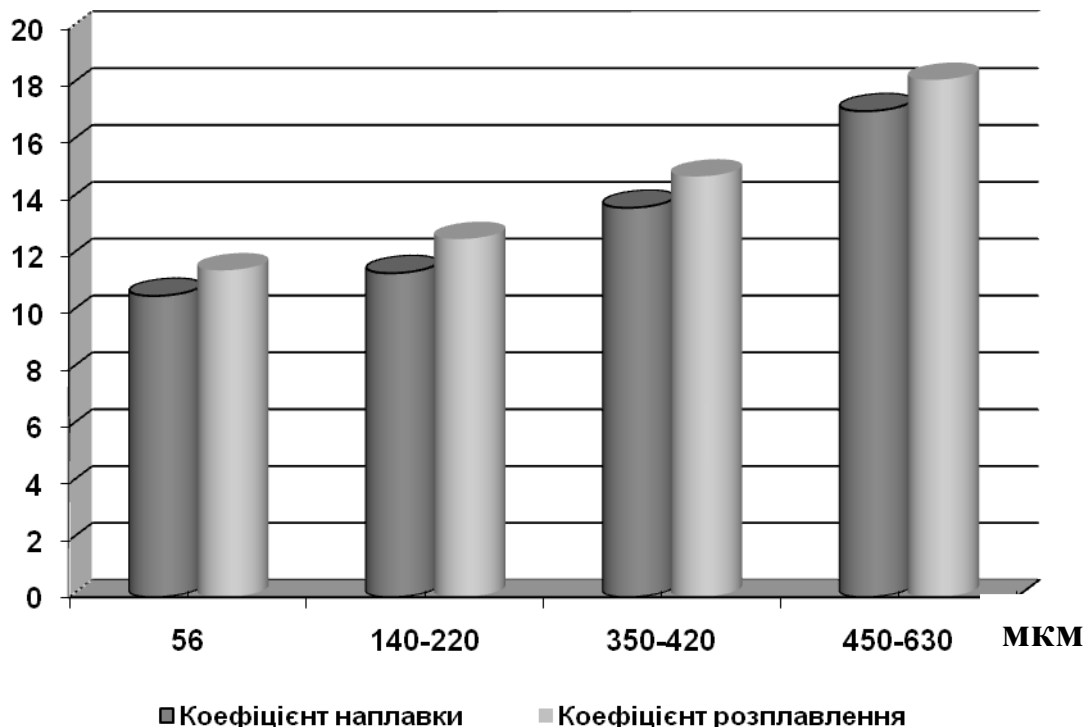


Рис.3 – Залежність характеристик плавлення електродів від розміру часток залізного порошку

Можна вважати, що теплофізичні властивості покриття залежать не тільки від складу або матеріалів його складових, а й від розміру часток цих матеріалів. Очевидно, чим менше розмір часток порошків, з яких складається покриття, а отже чим більше їх поверхня, тим інтенсивніше відбувається відвід тепла від стрижня і тим повільніше плавиться електрод.

При цьому різниця в коефіцієнті розплавлення в залежності від розміру часток може досягати 8-10%. На жаль, на практиці важко використовувати встановлену залежність, оскільки неможливо отримати тільки великий порошок, без втрат дрібного. Крім того, виникли б труднощі технологічного порядку в зв'язку з погіршенням опресування обмазувальної маси.

Висновки

1. Розв'язано задачу підвищення продуктивності і зварювально-технологічних властивостей електродів з основним покриттям, шляхом додавання до складу покриття залізного порошку.
2. Практична цінність полягає в можливості підвищення продуктивності зварювання і зварювально-технологічних властивостей основних електродів, без використання дорогих компонентів.

Список використаних джерел

1. Игнатченко В. П. Состояние и тенденции развития производства сварочных материалов в странах СНГ / В. П. Игнатченко, А. И. Бугай // Сборник докладов 1-ой Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ (Краснодар, 22-26 июня 1998 г.). – М., 1998. – С. 15–20.
2. Влияние степени окисленности на особенности структуры и механические свойства металла шва, выполненного электродами с рутиловым и ильменитовым покрытиями / И. К. Походня, Г. Е. Коляда, И. Р. Явдошин, Л. И. Маркашева, В. Г. Свечинский // Автоматическая сварка. – 1982. – № 2. – С. 10–14.
3. Сидлин З. А. Современные ильменитовые электроды / З. А. Сидлин. – М. : Ротекс, 2002. – 30 с.
4. Явдошин И. Р. Новые электроды ИЭС им. Е.О. Патона для сварки конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей / И. Р. Явдошин // Сборник докладов 1-ой Междунар. конф. по сварочным материалам стран СНГ (Краснодар, 22-26 июня 1998 г.). – М., 1998. – С. 135–137.
5. Welding —Recommendations for welding of metallic materials. Part 2 : Arc welding of ferritic steels : The European Standard EN 1011-2:2001, with the incorporation of amendment A1:2003 has the status of a British Standard. – Access mode : <http://energomsw.ru/images/EN-1011-2.pdf>.
6. TWI : Веб-страница. – Режим доступа : <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-consumables-part-1-082/>

References

1. Ignatchenko, VP & Bugaj, AI 1998, 'Sostojanie i tendencii razvitija proizvodstva svarocnyh materialov v stranah SNG', *Sbornik dokladov 1-oi Mezhdunarodnoj konferencii po svarocnym materialam stran SNG*, Moskva, pp. 15-20.
2. Pohodnja, IK, Koljada, GE, Javdosshin, IR, Markasheva, LI & Svecinskij, VG 1982, 'Vlijanie stepeni okislennosti na osobennosti struktury i mehanicheskie svojstva metalla shva, vypolnennogo jelektrodami s rutilovym i ilmenitovym pokrytijami', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 2, pp. 10-14.
3. Sidlin, ZA 2002, *Sovremennye ilmenitovye jelektrody*, Roteks, Moskva.
4. Javdosshin, IR 1998, 'Novye jelektrody IJeS imeni E.O. Patona dlja svarki konstrukcij iz nizkouglerodistyh i nizkolegированных stalej', *Sbornik dokladov 1-oi Mezhdunarodnoj konferencii po svarocnym materialam stran SNG*, Moskva, pp. 135-137.
5. Welding —Recommendations for welding of metallic materials. Part 2 Arc welding of ferritic steels : The European Standard EN 1011-2:2001, with the incorporation of amendment A1:2003 has the status of a British Standard 2004, viewed 03.06.20, <<http://energomsw.ru/images/EN-1011-2.pdf>>.
6. TWI n.d., viewed 03.06.20, <<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-consumables-part-1-082/>>.

Стаття надійшла до редакції 01 грудня 2020 року

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-73-78

УДК 621.791

ОСОБЛИВОСТІ РОЗКИСЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ ВУГЛЕЦЕМ, ПОВ'ЯЗАНИМ В Fe-C СПЛАВ

©Калін М.А.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Калін Микола Андрійович: ORCID 0000-0002-4068-2718; svargof@dmil.com; кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна

Метою дослідження є вибір раціональної системи розкислення металу шва ільменітових електродів, які за рівнем міцності, пластичності і ударної в'язкості не поступалися б швам, звареним електродами з рутиловим покриттям. Розкислення металу шва феромарганцем, а також частково феросиліцієм і феротитаном практично вичерпало свої можливості.

Необхідно більш інтенсивно розвивати раціональні системи розкислення металу шва, серед яких, завдяки ряду переваг, слід виділити новий напрямок - розкислення вуглецем, пов'язаним в Fe-C сплав.

Для досліджень використовували металеві електроди для ручного дугового зварювання низьколегованих сталей. Застосовували покриття електродів ільменітового виду. Як розкислювач застосовували феромарганець марки ФМн 1. Як сплав Fe-C використовували сірий чавун марки СЧ18 у вигляді порошку. Вміст вуглецю в чавуні становив 3,5%. Як вуглець у вільному стані використовували графіт кристалічний марки ГСМ-2. Коефіцієнт ваги покриття електродів становив 0,45 ... 0,47. Для порівняння виготовляли електроди без вуглецевих компонентів.

Плавлення електродів з чавунним порошком в покритті характеризується утворенням легкоплавкого шлакового прошарку з товщиною 0,1 ... 0,2 мм. Мікротвердість металу краплі в її верхній частині становить $H_{20} = 1800$ МПа. На кінці електрода спостерігається утворення прошарку вуглецевого розплаву товщиною приблизно 0,1 мм, скупчення газових бульбашок і шлакових включень, які свідчать про інтенсивний процесі кипіння металу в нижній частині краплі. Мікротвердість металу в нижній частині краплі становить $H_{20} = 3400$ МПа.

У електродах з графітом в покритті відбувається інтенсивне кипіння металу по всьому об'єму краплі внаслідок наявності твердих включень графіту. Графіт вступає в реакції окислення в твердому стані. Тому неможливо повноцінно використовувати графіт як раскислювач у зварювальних електродах даного виду.

При використанні чавунного порошку, в кількості що не перевищує критичного, науглецювання наплавленого металу немає, що дозволяє використовувати його в якості розкислювача.

Ключові слова: електрод, чавунний порошок, графіт, ільменіт, зварювання, твердість

Калін Н.А. „Особенности раскисления электродного металла углеродом, связанным в Fe-C сплав“.

Целью исследования является выбор рациональной системы раскисления металла шва ильменитовых электродов, которые по уровню прочности, пластичности и ударной вязкости

не уступали бы швам, выполненными электродами с рутиловым покрытием. Раскисление металла шва ферромарганцем, а также частично ферросилицием и ферротитаном практически исчерпало свои возможности.

Необходимо более интенсивно развивать рациональные системы раскисления металла шва, среди которых, благодаря ряду преимуществ, следует выделить новое направление - раскисление углеродом, связанным в Fe-C сплав.

Для исследований использовали металлические электроды для ручной дуговой сварки низколегированных сталей. Применяли покрытия электродов ильменитового вида. Как раскислитель применяли ферромарганец марки ФМн 1. Как сплав Fe-C использовали серый чугун марки СЧ18 в виде порошка. Содержание углерода в чугуне составило 3,5%. Как углерод в свободном состоянии использовали графит кристаллический марки ГСМ-2. Коэффициент веса покрытия электродов составил 0,45 ... 0,47. Для сравнения изготавливали электроды без углеродных компонентов.

Плавление электродов с чугуном порошком в покрытии характеризуется образованием легкоплавкого шлакового слоя толщиной 0,1 ... 0,2 мм. Микротвердость металла капли в ее верхней части составляет $H_{20} = 1800$ МПа. На конце электрода наблюдается образование прослойки углеродного расплава толщиной примерно 0,1 мм, скопление газовых пузырьков и шлаковых включений, свидетельствует об интенсивном процессе кипения металла в нижней части капли. Микротвердость металла в нижней части капли составляет $H_{20} = 3400$ МПа.

В электродах с графитом в покрытии происходит интенсивное кипение металла по всему объему капли вследствие наличия твердых включений графита. Графит вступает в реакции окисления в твердом состоянии. Поэтому невозможно полноценно использовать графит как раскислитель в сварочных электродах данного вида.

При использовании чугунного порошка, в количестве не превышающем критического, науглероживание наплавленного металла не происходит, что позволяет использовать его в качестве раскислителя.

Ключевые слова: электрод, чугунный порошок, графит, ильменит, сварка, твердость.

Kalin M. "Features of deoxidation of electrode metal by carbon bonded to a Fe-C alloy".

The aim of the study is the choice of a rational system for deoxidation of the weld metal of ilmenite electrodes, which in terms of strength, ductility and impact strength would not be inferior to welds made with rutile-coated electrodes. Deoxidation of the weld metal by ferromanganese, as well as partially by ferrosilicon and ferrotitanium, has practically exhausted its capabilities.

It is necessary to more intensively develop rational systems for deoxidation of weld metal, among which, due to a number of advantages, a new direction should be singled out, which is deoxidation with carbon bound in a Fe-C alloy.

For research, metal electrodes were used for manual arc welding of low alloy steels. Coatings of electrodes of ilmenite type were used. Ferromanganese of the FMN grade 1 was used as a deoxidant. Gray iron of the SCh18 grade was used as a powder in the form of a Fe-C alloy. The carbon content of cast iron was 3.5%. Crystalline graphite GSM-2 was used as carbon in the free state. The weight coefficient of the coating of the electrodes was 0.45 ... 0.47. For comparison, electrodes without carbon components were made.

Melting electrodes with cast iron powder in the coating is characterized by the formation of a fusible slag layer with a thickness of 0.1 ... 0.2 mm. The microhardness of the metal of the drop in

its upper part is $H_{20} = 1800$ MPa. At the end of the electrode, the formation of a layer of carbon melt with a thickness of about 0.1 mm is observed, the accumulation of gas bubbles and slag inclusions indicates an intensive process of boiling metal in the lower part of the drop. The microhardness of the metal in the lower part of the drop is $H_{20} = 3400$ MPa.

In the electrodes with graphite in the coating, intense boiling of the metal occurs over the entire volume of the drop due to the presence of solid inclusions of graphite. Graphite enters an oxidation reaction in a solid state. Therefore, it is impossible to fully use graphite as a deoxidizer in welding electrodes of this type.

When using cast iron powder, in an amount not exceeding critical, carburization of the deposited metal does not occur, which allows it to be used as a deoxidizing agent.

Keywords: electrode, cast iron powder, graphite, ilmenite, welding, hardness.

Постановка проблеми

Для підвищення якості металу шва і зварювально-технологічних властивостей ільменітових електродів актуальним є питання вибору раціональної системи розкислення металу шва, який за рівнем міцності, пластичності і ударної в'язкості не поступався б швам, звареним електродами з рутиловим покриттям. Розкислення металу шва феромарганцем, а також частково феросиліцієм і феротитаном практично вичерпало свої можливості. Введення великих кількостей марганцю погіршує санітарно-гігієнічні характеристики електродів. Підвищити якість зварних швів ільменітових електродів шляхом збільшення вмісту в покритті кремнію і титану не вдається через утворення пор і горячих тріщин в зварних швах [1].

Аналіз останніх досліджень

Однак, відомі способи використання вуглецю у вільному стані (у вигляді графіту, сажі, попелу і ін.) не можуть повністю вирішити поставлене завдання [2-5]. Це пов'язано з тим, що вільний вуглець стає активним розкислювачем тільки при температурі вище 2500 К, характерною для стовпа дуги, а на стадії краплі і в зварювальній ванні відбувається коксування рідкого металу. При охолодженні металу шва відбувається окислення розчиненого надлишкового вуглецю з виділенням CO і утворенням пор в зварних швах [8-11].

Для виходу з положення, що створилося необхідно більш інтенсивно розвивати раціональні системи розкислення металу шва, серед яких, завдяки ряду переваг, слід виділити новий напрямок - розкислення вуглецем, пов'язаним в Fe-C сплав.

Перевага розкислення вуглецем полягає в тому, що продуктом реакції є газоподібний оксид вуглецю - CO, виділяється в газову фазу дуги і не засмічує метал шва неметалевими включеннями. Крім того, CO служить додатковим газовим захистом зварювальної ванни.[6,7].

Експериментальна частина

Для досліджень використовували металеві електроди для ручного дугового зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей, що виготовляються способом обпресування. Стрижні електродів виготовляли зі сталевого зварювального дроту марки Св-08А по ГОСТ 2246 діаметром 3 і 4мм.

Застосовували покриття електродів ільменітового виду, основу якого становить мінерал ільменіт $FeO \cdot TiO_2$, який використовується у вигляді ільменітового концентрату по ТУ 48-4-267-73. Як розкислювач металу шва застосовували феромарганець марки ФМн 1,0

по ГОСТ 4755. Як сплав Fe-C використовували сірий чавун марки СЧ18 за ГОСТ 1412, у вигляді порошку.

Вміст вуглецю в чавуні становив 3,5%. Як вуглець у вільному стані використовували графіт кристалічний марки ПММ-2 по ГОСТ 18191.

Коефіцієнт ваги покриття електродів становив 0,45...0,47 при товщині покриття на сторону 0,8 мм електродів діаметром 3 мм, і 1 мм - електродів діаметром 4 мм. Виготовляли по 7 варіантів електродів з чавунним порошком і графітом в покритті з еквівалентним вмістом вуглецю до ваги електродного стрижня: 0,12; 0,16; 0,20; 0,24; 0,28; 0,32; 0,36%. Для порівняння виготовляли електроди без вуглецевих компонентів (варіант О), а також використовували промислові електроди марок АНО-6, АНО-32 з ільменітовим видом покриття і МР-3, АНО-4 з рутиловим покриттям.

Результати досліджень

Плавлення електродів, що містять чавунний порошок в покритті характеризується утворенням легкоплавкого шлакового прошарку з товщиною 0,1 ... 0,2 мм, (див.рис.1), що піднімається уздовж електродного стрижня на висоту 1,3 ... 1,5 мм вище лінії розділу рідкої і твердої фази розплаву стрижня товщиною приблизно 0,1 мм. Скупчення газових бульбашок і шлакових включень свідчить про інтенсивний процес кипіння металу в нижній частині краплі. Частково знеуглецьований розплав переходить в метал краплі у вигляді дрібних включень розміром приблизно 0,05 мм. Мікротвердість металу в нижній частині краплі становить $H_{20} = 3400$ МПа (рис.2).



Рис.1 – Мікроструктура металу кінця електрода з покриттям що містить 10% чавунного порошку: x 120

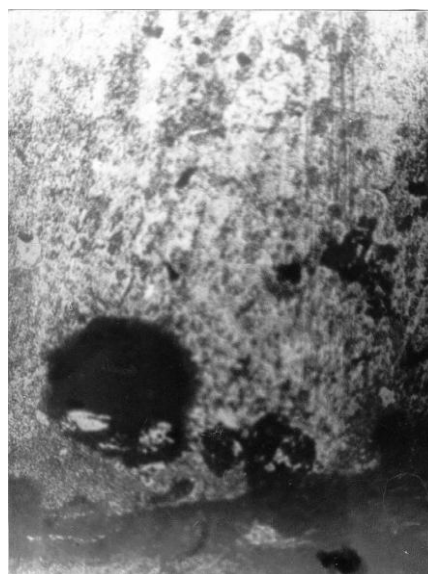


Рис.2 – Мікроструктура металу кінця електрода з покриттям що містить 10% чавунного порошку: x 500

Дрібні частинки вуглецевого розплаву, у міру підйому у верхню частину краплі, зменшуються до 0,03...0,01 мм і на висоті приблизно 0,5...0,6мм повністю розчиняються в металі краплі. При цьому вони оточені газовими бульбашками CO. Газ CO накопичується в нижній, найбільш нагрітій частині краплі і при досягненні критичного тиску вибухово викидається в зону дуги. При цьому на поверхні краплі утворюється характерне заглиблення (рис. 3). У електродах з графітом в покритті відбувається інтенсивне кипіння металу по

всьому об'єму краплі внаслідок наявності в ньому твердих включень непрореагуваного графіту (рис. 4).

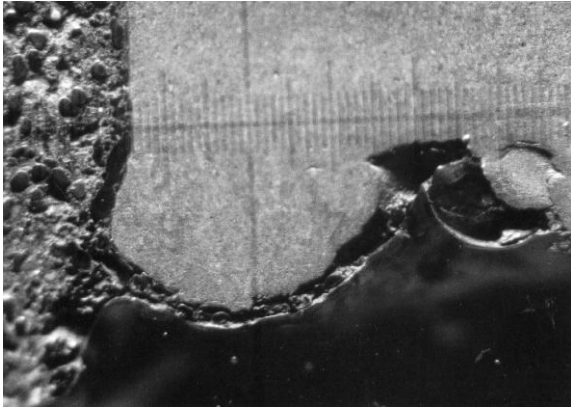


Рис.3 – Макроструктура металу кінця електрода з покриттям що містить 10% чавунного порошку: х 27



Рис.4 – Макроструктура металу кінця електрода з покриттям що містить 0,35% графіту: х 27

Повністю реакція окислення твердого графіту на цій стадії не закінчується. Залишки твердої фракції графіту переходять у ванну і науглецьовують метал шва.

Покриття електродів 0 варіанту (рис. 5) плавиться без кипіння металу краплі.

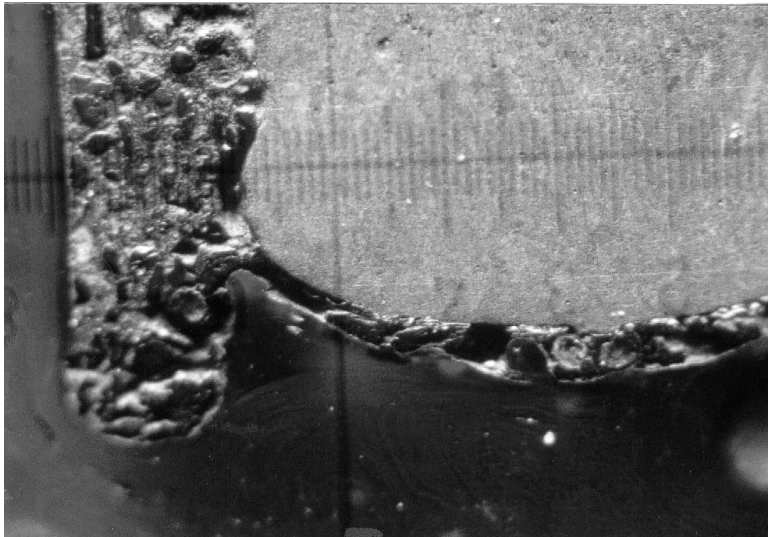


Рис.5 - Макроструктура металу кінця електрода з покриттям без вуглецю: х 27

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що графіт, маючи високу (3723°K) температуру плавлення, вступає в реакції окислення з газовою, шлаковою і металевими фазами дуги в твердому стані. При цьому, швидкість окислення графіту в покритті ільменітового виду в два рази нижче, ніж вуглецю в Fe-C сплаві, що призводить до необхідності зниження його критичного вмісту в електроді. Тому неможливо повноцінно використовувати графіт як раскислювач у зварювальних електродах даного виду.

Окислення вуглецю Fe-C сплаву, має ряд відмінних рис. Він розчиняється при плавленні порошку в його металевій основі і вступає в реакції знеуглецювання на стадії краплі. Після часткового окислення в шлаку, рідкий Fe-C сплав переходить в метал краплі, у вигляді дрібних включень де остаточно втрачає вуглець. Підвищений вміст вуглецю в металі нижньої частині краплі, в порівнянні з верхньою підтверджується їх мікротвердістю H20

(3400 МПа проти 1800 МПа). При використанні чавунного порошку, в кількості що не перевищує критичного для даної шлакової системи, науглецювання наплавленого металу немає, що дозволяє використовувати його в якості розкислювача.

Висновки:

1. Графіт, маючи високу (3723° К) температуру плавлення, вступає в реакції окислення з газовою, шлаковою і металевою фазами дуги в твердому стані.
2. Графіт розчиняється при плавленні порошку в його металевій основі і вступає в реакції знеуглецювання на стадії краплі.
3. При використанні чавунного порошку, в кількості що не перевищує критичного, науглецювання наплавленого металу немає, що дозволяє використовувати його в якості розкислювача.

Список використаних джерел

1. Явдошин И. Р. Новая информация о «старых» электродах / И. Р. Явдошин, О. И. Фольборт // Автоматическая сварка. – 2011. – № 1. – с. 56–57.
2. Шлепаков В. Н. Современные электродные материалы и способы электродуговой сварки плавлением / В. Н. Шлепаков // Автоматическая сварка. – 2011. – № 10. – с. 31–35.
3. Економіко-статистичний огляд зварювального виробництва і ринку зварювальної техніки України в 1990–2014 рр. – К.: Вид-во ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2015. – 75 с.
4. Зовнішньоекономічна діяльність України в 2002–2015 рр. (зварювальні матеріали та обладнання). – К.: Вид-во ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2016. – 35 с.
5. Пустовойт С. В. Состояние и тенденции развития рынка сварочных электродов в Украине / С. В. Пустовойт, Н. В. Скорина, В. С. Петрук // Автоматическая сварка. – 2017. – № 1. – С. 73-78.
6. Калін, М. А. Вплив чавунного порошку на склад шлаку зварювальних електродів ільменітового виду / М. А. Калін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Х., 2007. – N 3/1. – С. 59-61.
7. Калін, М. А. Застосування чавунного порошку в якості розкислювача в електродах з кислим покриттям / М. А. Калін // Машинобудування: збірник наук. пр./ Укр. інж.-пед. акад.. – Х., 2012. – Вип. 10. – С. 166-172.
8. Ізотова, К. О. Розробка термітного електродного покриття для зварювання сталей в монтажних умовах / К. О. Ізотова. // Машинобудування: зб. наук. пр./ Укр. інж.-пед. акад.. – Харків: УІПА, 2019. – Вип. 23. – С. 122-129.
9. Svenson, L. E. and Johan Elvander. "Challenges for welding consumables for the new millennium", Svetsaren, №1, V.53, 1999, pp. 3-11.
10. Bruno Pekkari // Svetsaren. – 2006. – № 3. – P. 12–16.
11. Welding and cutting: 'Selection of stick electrodes (part 1) welding and cutting.' Vol. 123, No. 4, 2013.

References

1. Javdoshhin, IR & Folbort OI 2011, 'Novaja informacija o «staryh» jelektrodah', *Avtomaticeskaja svarka*, no. 1, pp. 56-57.
2. Shlepakov, VN 2011, 'Sovremennye jelektrodnye materialy i sposoby jelektrodugovoj svarki plavleniem', *Avtomaticeskaja svarka*, no. 10, pp. 31-35.
3. *Ekonomiko-statystychnyi ohliad zvaryvalnoho vyrobnytstva i rynku zvaryvalnoi tekhniky Ukrainy v 1990-2014 rr* 2015, Vydavnytstvo Instytutu elektrozvaryuvannia imeni Ye.O.Patona, Kyiv.
4. *Zovnishnoekonomichna diialnist Ukrainy v 2002–2015 rr. (zvaryvalni materialy ta obladnannia)* 2016, Vydavnytstvo Instytutu elektrozvaryuvannia imeni Ye.O.Patona, Kyiv.
5. Pustovojt, SV, Skorina, NV & Petruk, VS 2017, 'Sostoianie i tendencii razvitija rynku svarochnykh jelektrodov v Ukraine', *Avtomaticeskaja svarka*, no. 1, pp. 73-78.
6. Kalin, MA 2007, 'Vplyv chavunnoho poroshku na sklad shlaku zvaryvalnykh elektrodov ilmenitovoho vydu', *Vostochno-evropejskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi*, no. 3/1, pp. 59-61.
7. Kalin, MA 2012, 'Zastosuvannia chavunnoho poroshku v yakosti rozkysliuvacha v elektrodakh z kyslym pokryttiam', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, iss. 10, pp. 166-172.
8. Izotova, KO 2019, 'Rozrobka termitnoho elektrodnoho pokryttia dla zvaryuvannia stalei v montazhnykh umovakh', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, iss. 23, pp. 122-129.
9. Svenson, LE & Elvander, J 1999, 'Challenges for welding consumables for the new millennium', *Svetsaren*, no. 1, vol. 53, pp. 3-11.
10. 'Bruno Pekkari' 2006, *Svetsaren*, no. 3, pp. 12-16.
11. 'Selection of stick electrodes (part 1) welding and cutting' 2013, *Welding and cutting*, vol. 123, no. 4.

Стаття надійшла до редакції 01 грудня 2020 року

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-79-88

УДК 621.7.044

АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В КЛЕЙОВОМУ ШАРІ З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ НАПРЯМНОЇ СИСТЕМИ УСПШ

Фролов Е.А.¹, Муравльов В.В.², Дерябкина Е.С.³, Агарков В.В.⁴

Полтавський національний технічний університет імені Ю. Кондратюка¹

Полтавський державний аграрний університет²

Українська інженерно-педагогічна академія³

Державне підприємство «Харківстандартметрологія»⁴

Інформація про авторів:

Фролов Євгеній Андрійович: ORCID 0000-0002-9415-1066, naumova olga1@mail.ru; доктор технічних наук, професор; професор кафедри технології машинобудування; Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка; Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна.

Муравльов Володимир Вячеславович: ORCID: 0000-0002-3221-0411; mvv02021975@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри галузевого машинобудування; Полтавський державний аграрний університет; вул. Сковороди, 1/3, м. Полтава, 36003, Україна.

Дерябкина Євгенія Станіславівна: ORCID 0000-0002-5531-0124, 216464 @ mail.ru кандидат технічних наук; доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська 16, м. Харків, Україна.

Агарков Віктор Васильович: ORCID 0000-0001-9883-0480; 290@mti.kharkov.ua; кандидат технічних наук; заступник директора, начальник лабораторії; Державне підприємство "Харківстандартметрологія", вул. Мироносицька, 36, м. Харків, 61003, Україна.

Метою досліджень було створення надійних методів аналітичного розрахунку напружень у клейовому шарі з'єднання напрямна колонка - втулка (обойма) в конструкції універсальної складальної переналагоджуваної штампової оснастки. Встановлено, що товщина клейового шару може бути від декількох десятків дольових міліметрів до 0,5-1,2 мм, при цьому епоксидний клей має модуль пружності у 100 раз менше, ніж модуль пружності матеріалів обойми або спрямовуючої колонки. Використовуючи закон Гука вважаємо, що матеріал клею, який затвердів, однорідний, ізотропний і фізично лінійний. Враховуючи, що маємо симетричне навантаження і рівномірність у клейовій поверхні, отримали напруження у деякій точці поверхні, яка виражається системою рівнянь. Таким чином, формули, які отримали, дозволяють визначити максимальну величину переміщення направляючої колонки УСПШ під дією горизонтального зусилля, а також привести розрахунок на міцність клейової поверхні у будь-якій точці поверхні, розташованій під кутом. Встановлено, якщо для матеріалу клею, який затвердів, виконується умова $\sigma \leq [\sigma]$, то міцність клейового прошарку забезпечена. В іншому випадку необхідно або замінити горизонтальну складову зусилля штампування або збільшити діаметр направляючої колонки і вишину клейового з'єднання.

Ключові слова: направляюча колонка, втулка, клейове з'єднання, напруження, зусилля штампування, універсально - збірний переналагоджуваний штамп.

Фролов Е.А., Муравльов В.В., Дерябкина Е.С., Агарков В.В. „Аналитическое определение напряжений в клеевом слое соединения элементов направляющей системы УСПШ“

Целью исследований было создание надежных методов аналитического расчета напряжений в клеевом слое соединения направляющая колонка - втулка (обойма) в конструк-

ции универсально-сборной переналаживаемой штамповой оснастки. Установлено, что толщина клеевого слоя может быть от нескольких десятых долей миллиметров до 0,5-1,2 мм, при этом эпоксидный клей имеет модуль упругости в 100 раз меньше, чем модуль упругости материалов обоймы или направляющей колонки. Используя закон Гука полагаем, что материал затвердевшего клея, однородный, изотропный и физически линейный. Учитывая, что у нас симметричное нагрузки и равномерность в клеевой поверхности, получили напряжение в некоторой точке поверхности, которая выражается системой уравнений. Таким образом, полученные формулы позволяют определить максимальную величину перемещения направляющей колонки УСПШ под действием горизонтального усилия, а также привести расчет на прочность клеевой поверхности в любой точке поверхности, расположенной под углом. Установлено, если для материала затвердевшего клея выполняется условие $\sigma \leq [\sigma]$, то прочность клеевого слоя обеспечена. В противном случае необходимо либо заменить горизонтальную составляющую усилия штамповки или увеличить диаметр направляющей колонки и толщину клеевого соединения.

Ключевые слова: направляющая колонка, втулка, клеевое соединение, напряжения, усилие штамповки, универсально - сборный переналаживаемый штамп.

Frolov E., Muravlyov V., Deryabkina E., Agarkov V. "Analytical determination of stresses in the adhesive layer of joining elements of the USPSh guide system".

The aim of the research was to create reliable methods of analytical calculation of stresses in the adhesive layer of the connection of the guide column – sleeve (holder) in the design of the universal assembly reconfiguration stamping equipment. It is established that the thickness of the adhesive layer can be from a few tenths of a millimeter to 0.5-1.2 mm, while the epoxy adhesive has a modulus of elasticity 100 times less than the modulus of elasticity of the materials of the clamp or guide column. Using Hooke's law, we assume that the hardened adhesive material is homogeneous, isotropic, and physically linear. Given that we have a symmetrical load and uniformity in the adhesive surface, we obtained stresses at some point on the surface, which is expressed by a system of equations. Thus, the formulae obtained allow determining the maximum value of the movement of the USPSh guide column under the action of horizontal force, as well as calculating the strength of the adhesive surface in any angled point of the surface. It is established that if the condition $\sigma \leq [\sigma]$ is fulfilled for the hardened adhesive material, then the strength of the adhesive layer is provided. Otherwise, it is necessary to either replace the horizontal component of the stamping force or increase the diameter of the guide column and the height of the adhesive joint.

Keywords: guide column, sleeve, adhesive connection, tension, stamping force, universally folded adjustable stamp.

Вступ

Як показала практика, технологічна собівартість універсально - збірного переналагоджуваного штамп (УСПШ) складає 7-12% від вартості спеціального штамп, що дозволяє розширити межі економічно доцільного використання штампування у діапазоні 50-2000 деталей у рік.

Строк роботи основних елементів УСПШ складає 10-12 років, час на проектування, переналадження і складання універсально - збірного переналагоджуваного штампу складає 2-8 годин.

Таким чином, система УСПШ змінює старі методи технологічної підготовки виробництва нових виробів і дозволяє використати у широкому масштабі прогресивний метод листового штампування деталей в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва.

В зв'язку з цим особливе значення набуває правильний вибір оптимальних, науково - обґрунтованих конструктивних параметрів УСПШ, матеріалів для їх виготовлення, дослідження надійності і довговічності окремих вузлів УСПШ [1-4].

На деяких машинобудівних підприємствах при виготовленні блоків штампів використовується клейове з'єднання направляючих елементів. Цей спосіб значно скорочує трудомісткість виготовлення штампової оснастки. Крім того, при клейовому методі досягається висока точність установки колонок у штаповому блоці. У даний час відсутні які-небудь аналітичні матеріали і рекомендації по вибору параметрів клейового з'єднання [5-9].

Постановка проблеми

Одним з основних питань конструювання УСПШ є науково - обґрунтований вибір способу закріплення направляючих колонок (рис.1).



Рис. 1 - Направляючі елементи: а – УСШ-16; б – УСШ-8: 1 – направляюча колонка; 2 – нижня обойма; 3 – верхня обойма; 4 – направляюча втулка

Необхідно відмітити, що питанням досліджень вибору способу закріплення системи направлення у конструкціях штампів у вітчизняній і закордонній літературі приділяється недостатньо уваги. Більшість рекомендацій носить чисто прикладний характер і часто не підкріплюється якими-небудь експериментами. Дослідження конструкторських і технологічних основ системи направлення і її вплив на працездатність універсально - збірних переналагоджуваних штампів є актуальною науково-технічною задачею, яка представляє наукову і практичну цінність.

Мета досліджень - провести дослідження по аналітичному визначенню напружень у клейовому шарі з'єднання напрямна колонка-втулка (обойма) в конструкції універсально - збірного переналагоджуваного штампу.

Основний матеріал

В універсально - збірних переналагоджуваних штампах напрямна колонка з'єднується з нижньою обоймою нерухомо шляхом склеювання. Товщина клейового шару може бути від кількох десятих часток міліметра до 0,5-1,2 міліметра. Застосовуваний епоксидний клей має модуль пружності в 100 разів менший, ніж модулі матеріалів обойми або направляючої колонки [6-10].

Вважаючи, що, внаслідок малого модуля пружності клею, деформації колонки і обойми малі, в порівнянні з деформацією шару клею, ми приходимо до розрахункової схеми (рис.2), коли колонка і обойма є абсолютно жорсткими, а клей пружним.

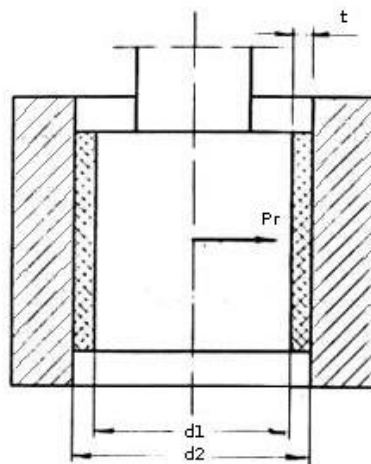


Рис.2 - Розрахункова схема клейового з'єднання

В процесі експлуатації внаслідок неточності збірки штампа, нерівномірності зазору між пуансоном і матрицею, похибки, що вносяться повзуном преса на напрямні колонки, а, отже, і на клейовий шар, діє горизонтальне зусилля P_r . Силами тертя, що виникають між мастильними поверхнями колонки і втулки нехтуємо. Таким чином, приходимо до схеми плоского напруженого стану клейового шару. Розглянемо радіальне переміщення колонки від дії сили P_r (рис. 3).

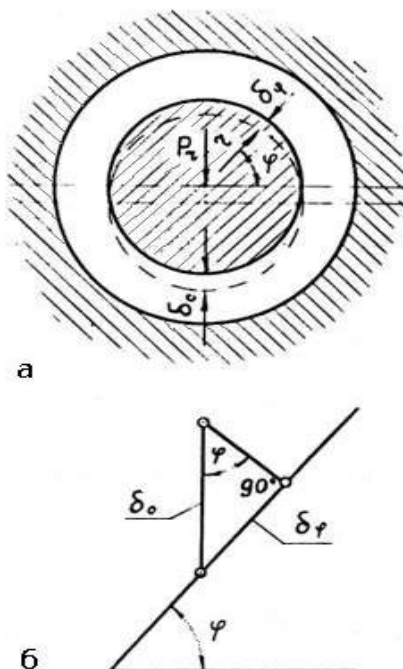


Рис.3 - Деформація клейового шару від радіальної сили

Колонка під дією сили переміститься, а клейовий шар деформується на величину сили δ_a . Переміщення довільної точки клею, що належить одночасно і колонці, буде визначати формулою:

$$\delta_\varphi = \delta_a \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

де δ_a - максимальне радіальне переміщення колонки від сили P_r ; φ - поточний центральний кут, що визначає положення даної точки.

Внаслідок деформації шару клею, в ньому виникнуть напруги (рис.4).

Максимальна відносна деформація клейового шару визначається відношенням:

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_a}{t} \quad (2)$$

де t - товщина клейового шару.

А $\varepsilon_\theta = 0$, вважаючи на абсолютну жорсткості колонки і обойми.

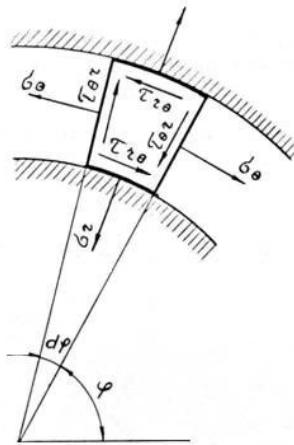


Рис.4 – Напружений стан елементу клею

Як було показано, товщина клейового шару не перевищує 1,2 мм. З аналізу конструкції з'єднання «колонка-обойма» випливає, що довжина кола направляючої колонки, а, отже, і клейового шару, становить від 63 до 126 мм, тобто в 50 - 100 разів більше шару клею. Таким чином, розглядається випадок, коли t мало в порівнянні з довжиною окружності клейового шару. Визначимо кут зсуву елемента клею $\gamma_{r\theta}$ вважаючи його сталим по товщині з огляду на мале значення t , (рис.5).

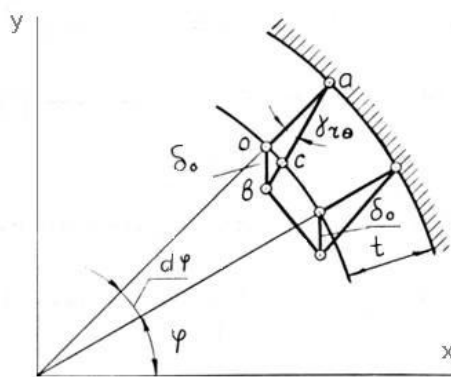


Рис. 5 – До визначення кута зсуву

З рис. 5 випливає, що $\angle COB = \varphi$, як кути із взаємно-перпендикулярними сторонами. З прямокутного трикутника слідує

$$OC = OB \cdot \cos \varphi$$

або $OC = \delta_o \cdot \cos \varphi$.

Тоді $\gamma_{r\theta} = \frac{OC}{t}$ або

$$\gamma_{r\theta} = \delta_a \cdot \frac{\cos \varphi}{t} \quad (3)$$

для $\varphi = 0$ $\gamma_{r\theta} = \frac{\delta_a}{t}$

для $\varphi = \frac{\pi}{2}$ $\gamma_{r\theta} = a$

Крім цього, в розглядуваній задачі

$$\gamma_{rz} = \gamma_{\theta z} = a$$

Знаючи компоненти деформованого стану, можна визначити виникаючі при цьому напруження.

Закон Гука для розглянутого плоского напруженого стану має вигляд

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\delta_r - \mu\delta_\theta);$$
$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\delta_\theta - \mu\delta_r); \quad (4)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{G}\tau_{r\theta}$$

При постановці завдання вважаємо, що матеріал клею, який затвердів, однорідний, ізотропний і фізично лінійний.

Вирішуючи спільно два перших рівняння системи (3), отримаємо:

$$\delta_r = \frac{E(\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta)}{1 - \mu^2}$$
$$\delta_\theta = \frac{E(\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r)}{1 - \mu^2} \quad (5)$$

а з останнього рівняння слідує, що

$$\tau_{r\theta} = G\gamma_{r\theta}, \quad (6)$$

де δ_r – радіальне напруження; δ_θ – тангенціальне напруження; $\tau_{r\theta}$ – дотичне напруження; E – модуль пружності I роду; G – модуль пружності II роду; μ – коефіцієнт Пуассону.

З урахуванням (1) і (2) вирази (5) і (6) запишуться в такий спосіб (максимальні значення):

$$\delta_r = \frac{E \frac{\delta_a}{t}}{1 - \mu^2}$$

$$\delta_\theta = \frac{E \mu \frac{\delta_a}{t}}{1 - \mu^2} \quad (7)$$

$$\tau_{r\theta} = G \frac{\delta_a}{t}$$

а напруження в довільній точці клейової поверхні можна визначити за формулами:

$$\varepsilon_r = \frac{E \delta_a}{t(1 - \mu^2)} \cdot \sin \varphi$$

$$\delta_\theta = \frac{E \mu \delta_a}{t(1 - \mu^2)} \cdot \sin \varphi \quad (8)$$

$$\tau_{r\theta} = G \frac{\delta_a}{t} \cdot \cos \varphi$$

Величину δ_a визначимо з умови рівноваги колонки (6), яке запишеться у вигляді

$$\sum P_x = 0 \quad (9)$$

$$\sum P_y = 0 \quad (10)$$

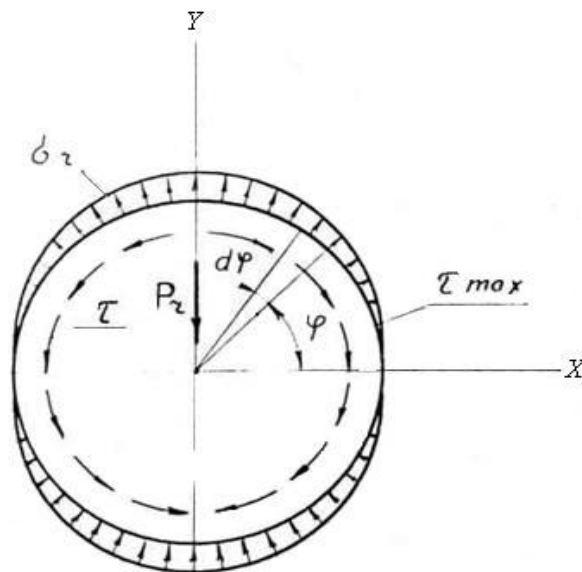


Рис. 6 – Схема навантаження направляючої колонки в місці закладення

Спроектуємо всі сили, прикладені по дузі з центральним кутом φ , на вертикальну вісь Y (рис. 7).

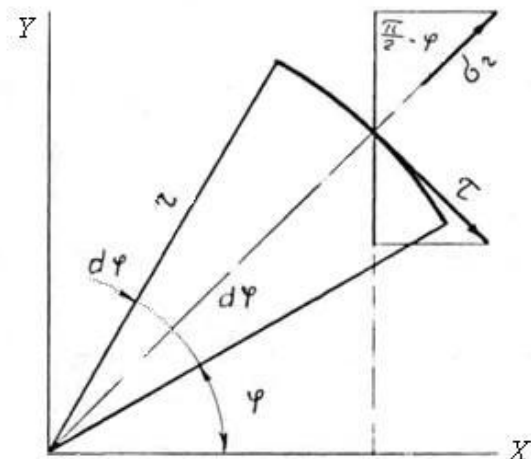


Рис. 7 – Схема розташування нормальних і дотичних напружень

З огляду на симетричності навантаження колонки щодо осі Y і з урахуванням пропозиції про рівномірності розподілу напружень в клейовому шарі по всій його висоті умова (8) задовольняється тотожно. Умова (9) в розгорнутому вигляді для розглянутого перетину записується в такий спосіб

$$\int_0^{2\pi} G_r r \sin \varphi d\varphi + \int_0^{2\pi} \tau_{r\theta} r \cos \varphi d\varphi - \frac{P_r}{B} = 0 \quad (11)$$

Підставляючи значення δ_r и $\tau_{r\theta}$ з (7) та (10) отримуємо

$$\frac{E \delta_{0r}}{t(1-\mu^2)} \int_0^{2\pi} \sin^2 \varphi d\varphi + G \frac{\delta_{0r}}{t} \int_0^{2\pi} \cos \varphi d\varphi - \frac{P_r}{B} = 0$$

Виконавши інтегрування і необхідні перетворення, знаходимо

$$\frac{E \delta_{0r}}{t(1-\mu^2)} \cdot \pi_r + G \frac{\delta_{0r}}{t} \cdot \pi_r - \frac{P_r}{B} = 0$$

Звідки

$$P_r = \pi_r \frac{\delta_0}{t} \left(G + \frac{E}{1-\mu^2} \right) \cdot B; \quad (12)$$

$$\delta_0 = \frac{P_r t}{\pi_r \left(G + \frac{E}{1-\mu^2} \right) B} \quad (13)$$

Остаточно вираз (7) з урахуванням (12) приймає наступний вигляд

$$\delta_r = \frac{P_r \cdot \sin \varphi}{\pi_r B \left[1 - \frac{G}{E} (1-\mu^2) \right]};$$

$$\delta_{\theta} = \frac{P_r \mu \cdot \sin \varphi}{\pi_r B \left[1 + \frac{G}{E} (1 - \mu^2) \right]} \quad (14)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{P_r \cdot \cos \varphi}{\pi_r B \left[1 + \frac{E}{G(1 - \mu^2)} \right]}$$

Висновки

Таким чином, отримані формули дозволяють визначити максимальну величину переміщення направляючої колонки під дією горизонтального зусилля, а також провести розрахунок на міцність клейового шару в будь-якій точці поверхні, розташованій під кутом.

Якщо для матеріалу затвердівшого клею виконується умова $\sigma \leq [\sigma]$, то міцність клейового прошарку забезпечена. В іншому випадку, як впливає з системи рівнянь (14), необхідно або зменшити горизонтальну складову зусилля штампування, або збільшити діаметр направляючої колонки і висоту клейового з'єднання.

Список використаних джерел

1. Агарков В. В. Совершенствование универсально-сборных переналаживаемых штампов путем оптимизации конструктивных параметров компоновок в условиях машиностроительных производств : дис. ... канд. техн. наук / В. В. Агарков. – Харьков, 2013. – 210 с.
2. Универсально-сборные переналаживаемые штампы для листовой штамповки / Н. К. Резниченко, Г. И. Ищенко, В. В. Агарков, А. Я. Мовшович // Вісник інженерної академії України. – 2011. – Вип. 3. – С. 95–98.
3. Буденный М. М. Перспективы развития исследований и разработка новых конструкций штамповой оснастки на основе композитов / М. М. Буденный // Резание и инструмент в технологических системах : сб. науч. трудов Харьков. гос. политехн. ун-та "ХПИ". – Харьков, 2005. – Вып. 58. – С. 25–28.
4. Мовшович А. Я. Конструкции и технологические возможности специализированных переналаживаемых гибочных штампов / А. Я. Мовшович, Ю. А. Кочергин // Вестник Национального технического университета «КПИ». – Киев, 2010. – С. 250–254.
5. Мовшович А. Я. Технологические системы холоднолистовой штамповки к вопросу обоснования расчетных схем элементов разделительных штампов / А. Я. Мовшович, Н. А. Ткачук, А. Н. Ткачук // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Машиностроение и САПР : сб. науч. трудов. – Харьков, 2008. – № 14. – С. 126–141.
6. Исследование точности деталей, получаемых в переналаживаемых штампах на основе композиционных материалов / Н. В. Чижиков, А. Я. Мовшович, А. Я. Горницкий, Л. Г. Кузнецова // Вісник Національного технічного університету : зб. наук. пр. Нац. техн. ун-ту «ХПИ». Харків, 2005. – Вип. 11. – С. 25–28.
7. Денисов В. И. Повышение износостойкости направляющих элементов универсально-сборных штампов / В. И. Денисов, И. Я. Мовшович. // Технология и организация производства. – 1980. – № 1. – С. 28–30.
8. Чижиков Н. В. Аналитическая оценка надежности систем обратимых штампов / Н. В. Чижиков, М. М. Буденный // Технічний прогрес та ефективність виробництва : зб. наук. пр. Нац. техн. ун-ту «ХПИ». – Харків, 2009. – Вип. 91. – С. 83–89.
9. Применение эпоксидных компаундов для закрепления направляющих элементов штампов / Г. Г. Жолткевич, В. И. Денисов, И. Я. Мовшович, А. Л. Хаатович // Технология и организация производства. – 1978. – № 4. – С. 31–34.

References

1. Agarkov, VV 2013, 'Sovershenstvovanie universalno-sbornykh perenalazhivaemykh shtampov putem optimizatsii konstruktivnykh parametrov komponovok v usloviyakh mashinostroitelnykh proizvodstv', Kand.tekh.n. thesis, Harkov.
2. Reznichenko, NK, Ishchenko, GI, Agarkov, VV & Movshovich, AY 2011, 'Universalno-sbornye perenalazhivaemye shtampy dlya listovoy shtampovki', *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy*, iss. 3, pp. 95-98.
3. Budennyj, MM 2005, 'Perspektivy razvitiya issledovaniy i razrabotka novykh konstruktsiy shtampovoy osnastki na osnove kompozitov', *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah*, Harkov, iss. 58, pp. 25-28.
4. Movshovich, AJ & Kochergin, JuA 2010, 'Konstrukcii i tehnologicheskie vozmozhnosti specializirovannykh perenalazhivaemykh gibochnykh shtampov', *Vestnik Nacionalnogo tehnikeskogo universiteta Kievskij politehnicheskij institut*, Kiev, pp. 250-254.
5. Movshovich, AJ, Tkachuk, NA & Tkachuk, AN 2008, 'Tehnologicheskie sistemy holodnolistovoy shtampovki k voprosu obosnovaniya raschetnykh shem jelementov razdelitelnykh shtampov', *Vestnik Nacionalnogo tehnikeskogo universiteta Harkovskij politehnicheskij institut*, Seriya Mashinostroenie i Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya, Harkov, no. 14, pp.126-141.
6. Chizhikov, NV, Movshovich, AJ, Gornickij, AJ & Kuznecova, LG 2005, 'Issledovanie tochnosti detalej, poluchaemykh v perenalazhivaemykh shtampah na osnove kompozicionnykh materialov', *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Kharkivskiy politekhnichnyi instytut*, Kharkiv, iss.11, pp. 25-28.
7. Denisov, VI & Movshovich, IJa 1980, 'Povyshenie iznosostojkosti napravljajushchih jelementov universalno-sbornykh shtampov', *Tehnologija i organizacija proizvodstva*, no. 1, pp. 28-30.
8. Chizhikov, NV & Budennyj, MM 2009, 'Analiticheskaja ocenka nadezhnosti sistem obratimyh shtampov', *Tekhnichniy prohres ta efektyvnist vyrobnytstva*, Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy Kyivskiy politekhnichnyi instytut, Kharkiv, iss. 91, pp. 83-89.
9. Zholtkevich, GG, Denisov, VI, Movshovich, IJa & Haetovich, AL 1978, 'Primenenie jepoksidnykh kompaundov dlya zakreplenija napravljajushchih jelementov shtampov', *Tehnologija i organizacija proizvodstva*, no. 4, pp. 31-34.

Стаття надійшла до редакції 17 листопада 2020 р.

ДО УВАГИ АВТОРІВ

У зв'язку зі зміною редакційної політики та популяризацією за кордоном збірника наукових праць УПА «Машинобудування» (далі – Збірник) через світові бібліографічні, наукометричні бази, міжнародні каталоги повідомляємо наступне.

Науковий фаховий Збірник приймає до публікації наукові праці з питань технології машинобудування, піднімально-транспортних машин, верстатів та інструментів і динаміки та міцності машин.

Збірник зареєстровано у Міжнародному центрі періодичних видань, йому присвоєно Міжнародний стандартний номер серіального видання ISSN (International Standard Serials Number) 2079-1747 (print). Збірник індексується в міжнародних каталогах та наукометричних базах даних: Index Copernicus, Google Scholar, ROAR (Registry of Open Access Repositories), OpenDOAR (The Directory of Open Access Repositories).

Публікаційна етика та правила оформлення наукових публікацій

Редакційна колегія Збірника орієнтується в роботі на норми та принципи міжнародної організації Committee on Publication Ethics (COPE), її політика базована на рекомендаціях Budapest Open Access Initiative (BOAI).

Опубліковані в Збірнику наукових праць УПА статті мають бути результатом наукових досліджень авторів, внеском у розвиток науки і забезпечувати спадкоємність наукових поглядів. З урахуванням цього редакція встановлює стандарти етичної поведінки для всіх сторін, що беруть участь в процесі публікації.

Обов'язки авторів

1. Стандарт авторства

Авторство має бути обмежене лише тими, хто вніс значний внесок в одержання результатів дослідження (розробка концепції, наукової ідеї та інш.). Автор, який представляє редакції рукопис, повинен гарантувати, що ним вказано всіх співавторів, що вони бачили і схвалили остаточний варіант рукопису і згодні з її поданням до редакції для публікації.

Статті, що подаються аспірантами, здобувачами, повинні мати рекомендацію наукового керівника, якщо він не є співавтором статті.

2. Стандарт однократності (неприпустимість паралельних публікацій).

Автор не повинен подавати до редакції рукопис раніше опублікованої статті. Він не повинен також подавати рукопис однієї і тієї ж за змістом статті в редакції декількох журналів одночасно.

Подача рукопису одночасно в кілька журналів є неетичною і неприйнятною.

3. Стандарт доступу до вихідних даних, дослідження та їх зберігання.

Автор зобов'язаний подати вихідні матеріали (дані) дослідження на вимогу редакції і повинен бути готовий надати публічний доступ до них. Автор повинен зберігати ці дані протягом певного часу після публікації.

4. Стандарт оригінальності і неприпустимість плагіату

Автор повинен представити в редакцію абсолютно оригінальну статтю. Якщо він використовував роботи або включає в свою статтю фрагменти з робіт (цитати) інших осіб, то таке використання має бути належним чином оформлене (лапки, виноска на джерело цитування, вказівка оригінального джерела в бібліографічному списку до статті).

Плагіат в будь-якій формі є неетичною і неприйнятною поведінкою автора.

5. Стандарт підтвердження джерел

Автор повинен в бібліографічному списку правильно вказати наукові та інші джерела, які він використовував у ході дослідження та які мали істотний вплив на результати дослідження.

Джерела, на які є виноска в тексті рукопису статті, повинні бути вказані в обов'язковому порядку. Інформація, отримана з неофіційних (приватних) джерел (розмова, листування, обговорення з третіми особами та ін.), не повинна використовуватися.

6. Стандарт виправлення помилок в опублікованих роботах

Якщо автор виявить суттєву помилку або неточність у вже опублікованій статті, то він зобов'язаний негайно повідомити про це редакцію і сприяти їй у виправленні помилки.

Якщо редакція дізнається про помилку від третіх осіб, то автор зобов'язаний негайно усунути помилку або представити докази її відсутності.

Загальні правила оформлення наукових публікацій

1. До друку приймаються наукові статті, що мають наукову і практичну цінність. Редакція приймає статті, повністю підготовлені до друку в збірнику наукових праць. Статті, оформлення яких не відповідає вказаним вимогам, не приймаються до друку.

2. Рішення щодо публікації (позитивне чи негативне) повідомляється автору. Стаття може бути повернена для доопрацювання. Рукописи авторам не повертаються.

3. Статті, відіслані авторам на доопрацювання, повинні бути повернені до редакції не пізніше, ніж через 10 днів після її одержання.

4. До розгляду приймаються наукові статті обсягом не менше 18-20 тис. знаків (включаючи таблиці, графіки, рисунки), формат паперу – А4, орієнтація – книжкова, всі поля – 2 см, міжрядковий інтервал – 1,5, кегль шрифту – 14, гарнітура – Times New Roman, абзац – 1,25 см.

5. Формули, рисунки, таблиці вставляються по тексту одразу після посилання на них. Ілюстрації повинні бути чіткими, формули – написані загально прийнятою символікою. Розмір шрифту в ілюстраційному матеріалі не менше 10 пт.

6. Статті подаються в друкованому (2 прим.) та в електронному варіантах у вигляді файлів (текст форматами DOC, RTF, графіки, рисунки – JPEG, TIFF). Якщо текст статті разом з ілюстраціями виконано у вигляді одного файлу, то необхідно додатково подати файл із ілюстраціями (одна ілюстрація – один файл).

7. На електронну адресу редакції подається комплект файлів, до якого має бути додано опис, де зазначаються:

- назва текстового редактора,
- імена файлів,
- назва збірника
- назва статті,
- розділ науки,
- прізвище, ім'я та по батькові авторів.

8. До редакції приймаються документи Microsoft Word версій до 2003 року (Word 11, Microsoft Office 2003). Документи Word 2007, Word 2010 **в форматі *.docx не приймаються.**

9. Редакція залишає за собою право вносити поправки до статей, не змінюючи основного змісту. Відповідальність за цитування та достовірність інформації несуть автори статей.

10. Мова публікацій: українська, російська, англійська.

11. Слід чітко розмежовувати тире (–) та дефіс (-). Необхідно використовувати однотипні лапки («...» – для українського та російського тексту статті та “...” – для англійського). Не допускається ставити абзацний відступ пробілами та клавішею Tab. Рядки тексту в межах абзацу не повинні розділятися клавішею Enter.

12. Не допускається використання переносів. Між ініціалами, ініціалами та прізвищем ставиться нерозривний пробіл. Нумерація сторінок не проставляється.

13. Збірник з опублікованою статтею надсилається авторові поштою або видається у редакції.

Структура наукової статті (відповідно вимог ДСТУ 7152:2010

«Видання. Оформлення публікацій у журналах і збірниках»)

Матеріали, подані до збірника, мають відповідати вимогам Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003 р. №7-05/1 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України», Постанови Кабінету Міністрів України від 27 січня 2010 р. № 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» та повинні мати такі необхідні відомості:

1. **Індекс УДК** (вирівнювання по лівому краю). Визначити код УДК ви можете на сайті бібліотеки: <http://library.uipa.edu.ua/>

2. **Назва статті** (вирівнювання по центру, шрифт – напівжирний, великі літери).

3. **Прізвище та ініціали авторів**, співавторів (шрифт напівжирний)

4. **Анотація** (авторське резюме) без слова «Анотація» подається трьома мовами – українською, російською, англійською. Анотація містить прізвища та ініціали авторів (напівжирний курсив), назву статті у лапках, текст анотації. Обсяг анотації повинен бути не менше 1800 знаків.

5. **Ключові слова** (напівжирний курсив) – 5-6 слів через крапку з комою трьома мовами – українською, російською, англійською.

6. **Текст наукової статті.**

7. **Список використаних джерел** українською або російською мовами відповідно до ДСТУ ГОСТ 7.1-2006 (дивись сайт бібліотеки <http://library.uipa.edu.ua/vikladacham-i-kuratoram.html>), англійською мовою відповідно до міжнародних стандартів (<https://web.library.uq.edu.au/files/424/filename.pdf>). В оригінальних роботах цитують не більш 15 праць, а в оглядах – до 50. Список повинний містити публікації за останні 10 років, більш ранні допускаються лише в особливих випадках.

8. **References** – список використаних джерел латинськими літерами відповідно до стандарту Harvard (Постанова Кабінету Міністрів України від 27 січня 2010 р. №55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею»).

На сайті <http://www.slovnuk.ua/services/translit.php> можна безкоштовно скористатися сервісом транслітерації україномовного тексту в латиницю.

На сайті <http://www.translit.net> є сервіс для транслітерації російськомовного тексту (стандарт BGN).

9. Стаття повинна супроводжуватися **авторською довідкою** (для кожного автора) трьома мовами – українською, російською, англійською.

10. Авторська довідка містить наступні дані:

- назва статті;
- прізвище, повне ім'я та по батькові;
- рік народження;
- вчений ступінь, вчене звання;
- місце роботи (англійською мовою – повна офіційно-прийнята назва установи);
- посада;
- ідентифікатор ORCID (дивись сайт бібліотеки: <http://library.uipa.edu.ua/naukovtsyam/item/768-reiestratsiia-vchenykh-u-mizhnarodnomu-reiestri-orcid.html>);
- адреса для листування, телефон, e-mail;
- адреса для відправки авторського екземпляру.

У кінці довідки треба зазначити «Поданий матеріал раніше не публікувався і до інших видавництв не надсилався». «Не заперечую проти виставлення повного тексту статті на сайт Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, в реферативну базу даних «Україніка наукова» та повнотекстову базу даних «Наукова періодика України», сайт Наукової бібліотеки УПА.

Рекомендації до написання анотацій (авторських резюме) до наукових статей

До публікації приймаються рукописи з максимально конкретизованими анотаціями. Композиційно анотація може бути збудована за принципами IMRAD (Introduction, Methods (Methodology), Results and Discussion). Загальновизнаною світовою практикою є використання анотацій (англійською мовою – resume чи abstract) не лише як структурного компонента власне наукової статті, але й як окремої наукової форми, що має на меті ознайомити у найзагальніших рисах із суттю та змістом дослідження.

Актуальність – актуальність дослідження. Мета – мета і завдання дослідження. Не слід повторювати назву статті. Якщо з назви статті мета та завдання роботи є зрозумілими, то це речення слід пропустити. Наприклад, можна вказати – Розглянуті напрямки... Не використовувати такі слова як «В цій статті, в статті». Компетентні дослідники чудово розуміють, що мова йде саме про Вашу статтю.

Методи (методологія дослідження) – відомості про те, коли, де, як проводилося дослідження; яка інформація, методи використовувалися; хто був включений в групу піддослідних. **Метод або методологію** проведення роботи доцільно описувати в тому випадку, якщо вони відрізняються новизною або їх розробка становить самостійну частину роботи. У рефератах документів, що описують експериментальні роботи, вказують джерела даних і характер їхньої обробки.

Результати – основні висновки (конкретика), результати дослідження. Наприклад – Встановлено..., З'ясовано..., Показано... та ін. **Результати** роботи описують гранично точно й інформативно. Наводять основні теоретичні та експериментальні результати, фактичні дані, виявлені зв'язки і закономірності. При цьому перевага надається новим результатам і даним довгострокового значення, важливим відкриттям, висновкам, які спростовують наявні теорії, а також даними, що, на думку автора, мають практичне значення.

Висновки можуть містити рекомендації, оцінки, пропозиції, гіпотези, описані у статті. Не рекомендується вказувати, що Ваш підхід або методика є кращими, ніж в інших авторів. Це є зрозумілим із самого статусу статті як наукової.

Перспективи – інформація про те, як отриманий результат співвідноситься з висновками інших учених, які перспективи дослідження, напрями подальшої роботи, складності.

При підготовці анотації слід виходити з того, що Ви пишите для компетентних дослідників і широкого кола потенційних англomовних користувачів. Тому можете вводити до анотації спеціальні терміни. Слід чітко викладати свою позицію. Від стилю її викладення залежить кількість звертань і, що є особливо важливим і актуальним сьогодні, кількість цитувань Вашої публікації. Анотація не повинна містити загальних слів.

Авторське резюме повинно викладати суттєві факти роботи, і не повинно перебільшувати або містити матеріал, який відсутній в основній частині публікації.

Відомості, що містяться в заголовку статті, не повинні повторюватися в тексті авторського резюме. Скорочення та умовні позначення не допускаються.

В авторському резюме не робляться посилання на номер публікації в списку літератури до статті.

Слід уникати зайвих вступних фраз (наприклад, «автор статті розглядає»). Історичні довідки, якщо вони не становлять основний зміст документа, опис раніше опублікованих робіт та загальновідомі положення в рефераті не наводять.

У тексті анотації слід вживати синтаксичні конструкції, властиві мові наукових і технічних документів, уникати складних граматичних конструкцій (не застосовуваних у науковій англійській мові).

Обсяг тексту визначається змістом публікації (обсягом відомостей, їх науковою цінністю та / або практичним значенням), але **не повинний бути менше 1000 знаків**.

Приклад авторського резюме українською мовою:

Значна частина планів по впровадженню змін, що містять в своїй основі нововведення, або не доходить до практичної реалізації, або в дійсності приносить набагато менше користі, ніж планувалося..... У статті пропонується механізм ..., заснований на аналізі ... Дослідження спирається на звід правил і процедур, що містять серію методів, використання яких дозволяє ... До таких методів відносяться: ...Результатом розробленої автором методики ... є пропозиція, яка в своїй концептуальній основі орієнтується на ...вишукування шляхів та прискорить реалізацію....., що в кінцевому результаті призведе до....

Рекомендації до написання тексту наукової статті

Відповідно до Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003 р. №7-05/1 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України», текст статті має бути із зазначенням наступних елементів:

- **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;

- **аналіз останніх досліджень** і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття;
- **формулювання цілей статті** (постановка завдання);
- виклад **основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- **висновки** з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.

Особливості стилю наукової статті

Часто автори, які декларують звертання до наукової проблематики, використовують при цьому публіцистичний стиль викладу. Змішання стилів не є виправданим, оскільки створення якісного інтелектуального продукту не може асоціюватися із публіцистичністю у будь-якій її формі. Публіцистика і наука – це дві повноцінні, важливі для суспільного розвитку, але зовсім відмінні сфери інтелектуального самовираження. Отже, починаючи зі стадії осмислення прийомів збору інформації та закінчуючи формами викладу тих концепцій та ідей, до яких дійшов автор у результаті дослідження, слід чітко та однозначно орієнтуватися на загальнови-знані наукові стандарти рівня аргументованості та стилю викладу матеріалу.

При цьому треба пам'ятати, щоб у статті не було бездоказових тез та концепцій; усі ідеї знаходилися у закономірному та обґрунтованому взаємозв'язку; автор прагнув до максимальної об'єктивності та пошуку наукової істини, вільної від тиску ідеології та емоцій.

Рекомендації до складання списку використаних джерел

Після статті подається 2 списки:

Список використаних джерел (звичайний список літератури) та **References** (список для міжнародних БД, де дані українською/російською мовою описуються за допомогою транслітерації (<http://www.slovyuk.ua/services/translit.php>), а джерела англійською дублюються зі списку «Список використаних джерел»). Необхідно в опис документу в Списку та References вносити всіх авторів, не скорочуючи перелік до трьох, як це рекомендовано чинним у нас державним стандартом.

Правила оформлення списку літератури *References*, транслітерованого у романському алфавіті (латиниця)

Правильний опис використовуваних джерел у списках літератури є запорукою того, що цитована публікація буде врахована під час **оцінювання наукової діяльності її авторів**, отже, (по ланцюжку) — діяльності організації, регіону, країни.

За цитуванням журналу визначається його науковий рівень, авторитетність, ефективність діяльності його редакційної колегії і т. д. З цього виходить, що найбільш значущими складовими в бібліографічних посиланнях є **прізвища авторів і назви журналів**. Причому для того, щоб всі автори публікації були враховані в системі *Scopus*, **необхідно в опис статті вносити прізвища всіх авторів**, не скорочуючи їх до трьох, чотирьох та інше.

Для оформлення списку літератури *References* необхідно користуватись стандартом Harvard (<https://web.library.uq.edu.au/files/424/filename.pdf>).

Приклад опису статті з журналу:

Fritzowski, P & Kaminski, H 2009, 'Dynamics of a rope modeled as a discrete system with extensible members', *Computational Mechanics*, no. 44(4), pp. 473-480. doi:10.1007/s00466-009-0387-2.

Приклад опису книги:

Loveikin, V, Chovniuk, Yu, Dikteruk, M & Pastushenko, S 2004, *Modeliuvannia dynamiky mekhanizmiv vantazhopidiomnykh mashyn*, RVV MDAU, Mykolaiv.

Збірник наукових праць «Машинобудування» входить до Категорії Б наукових фахових видань, включених до Переліку наукових фахових видань України (технічні науки), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук і доктора філософії (кандидата наук) наказ МОН України №409 від 17.03.2020.

Збірник наукових праць «Машинобудування» зареєстровано у Державному комітеті інформаційної політики України у 2006 році (Свідоцтво про Державну реєстрацію засобу масової інформації серія КВ № 12132-1016Р). Друкований варіант видання зареєстровано у ISSN Register під номером ISSN 2079-1747.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

УДК 621 – 622

Машинобудування. Збірник наукових праць. Випуск 26. – Харків, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), 2020. – 94 с.

У збірнику подано результати наукових досліджень в галузі машинобудування. Розглянуто важливі проблеми міцності, стійкості, роботоздатності, динаміки вантажопідіймних, транспортуючих машин та верстатів, а також питання технології машинобудування.

Для викладачів, науковців, аспірантів, фахівців в галузі машинобудування.

SCIENTIFIC EDITION

UDC 621 – 622

Engineering. Collection of Scientific Papers. Issue 25. – Kharkiv, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy (UEPA), 2020. – 94 p.

There were considered the important problems of strength, steadiness, capacity for work, dynamics of loading transporting, technological, machines and imporers, also a question of machine-building technologic.

For instructors, research workers, post graduates, experts in the field of machine-building.



Підписано до друку 24.12.2020, Формат 60×84 ¹/₈. Умов. друк. арк. – 7,75.

Гарнітура *Times New Roman*. Друк цифровий. Наклад 50 прим. Ціна договірна.

ТОВ «Друкарня Мадрид». Свідоцтво серія ДК №4399 від 27.08.2012 р.

м. Харків, вул. Максиміліанівська, 11, тел. 0800-33-67-62