



ISSN 2079 – 1747
DOI 10.32820/2079-1747-2019-24

Міністерство освіти і науки України
Українська інженерно-педагогічна
академія

Машинобудування

Галузеве машинобудування
Матеріалознавство
Прикладна механіка

Машиностроение

Engineering

Industry engineering
Material Science
Applied mechanics

Збірник наукових праць

Видається 2 рази на рік

Видається з грудня 2007 р.

УІПА

2019
Харків

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.

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.

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

Dasic Predrag, D.Sc., Prof.

Dichev Dimitar, D.Sc., Prof.

Edl Milan, Ph.D., doc. Ing.

Відповідальні редактори

Подоляк О.С., к.тех.н., доц.

Сичов Ю.І., к.тех.н., доц.

Стрельчук Р. М., к.тех.н.

Редактор

Ротова Н.В.

Випусковий редактор

Стрельчук Р. М., к.тех.н.

Відповідальний секретар

Стрельчук Р. М., к.тех.н.

Дизайнер

Жубр В.А.

Адреса редакції:

Україна, 61003, м. Харків

вул. Університетська, 16

Українська інженерно-педагогічна академія

Тел. (057)733-78-18

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)733-78-18

Fax (057)731-32-36

Машинобудування

2019, № 24

Збірник наукових праць

Засновник

Українська інженерно-педагогічна академія
(УІПА)

Видається з грудня 2007 р.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкова-
ного засобу масової інформації

Серія КВ № 12132 – 1016Р від 26.12.2006.

ISSN 2079 – 1747

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24

Мови видання:

українська, російська, англійська

Друкується за рішенням Вченої ради УІПА,
протокол № 4 від 29 жовтня 2019 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, 2019

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>	6
Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Кадикало І.О. Оптимізація динамічних навантажень у пружних елементах вантажопідйомних кранів при різних способах підйому вантажу.....	6
Фідровська Н.М., Слєпужніков Є.Д., Перевозник І.А. Визначення міцності трьохшарової циліндричної оболонки.....	17
<u>Матеріалознавство</u>	24
Полянский В. И. Сравнительный анализ температуры резания при шлифовании и точении и условия ее уменьшения.....	24
Стрельчук Р. М., Шелковий О.М. Математичне моделювання робочої поверхні круга в умовах електроерозійного алмазного шліфування.....	33
Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Сподоба О.О. Математична модель динаміки зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора при суміщенні рухів рукояті та телескопічної секції.....	40
Фідровська Н.М., Писарцов О.С., Ломакін А.О. Удосконалення методики визначення довговічності канату.....	52
<u>Прикладна механіка</u>	59
Гордєєв А.С. Управління якістю механічної обробки.....	59
Ізотова К.О. Розробка електродів для наплавлення робочої частини металорізального інструменту.....	66
Ізотова К.О. Підвищення продуктивності рутилових електродів	74
Калін М. А. Удосконалення матеріалів для газового зварювання чавуну	80

Ламнауер Н.Ю., Пташний О.Д., Бобрицька Г.С. Про інтервали якості при оцінці технологій виготовлення виробів за параметром точності лінійного розміру.....	86
Lebed' V. T., Zaliatov A. F. Improving the process of heating the bandages of large composite rolling rolls to be dismantled.....	92
Малицкий И. Ф., Смирнов И. П. Контактные давления в соединениях с гарантированным натягом.....	108
Ситников Б.В., Маршуба В.П., Мірошніченко Н.М., Соловей Л.В., Широков Стефан Використання інтегрованих технологій при визначенні поперечних деформацій металу в зоні шва при аргонодуговому зварюванні алюмінію марки АД0.....	115
Фролов Е.А., Коробко Б.О., Агарков В.В., Дерябкина Е.С. Определение частоты свободных колебаний жесткого фундамента на упругом основании под действием импульса взрыва	124
До уваги авторів.....	131

ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ У ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ КРАНІВ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ

©Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Кадикало І.О.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Інформація про авторів:

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

Човнюк Юрій Васильович: ORCID: 0000-0002-0608-0203; ychovnyuk@ukr.net; кандидат технічних наук, доцент; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №7, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна

Кадикало Іван Олександрович: ORCID: 0000-0002-5686-5869; kadykaloivan@nubip.edu.ua; асистент кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна

Під час роботи вантажопідйомної техніки в елементах приводу та металоконструкції виникають значні динамічні навантаження, що призводять до пришвидшеного виходу елементів конструкції і механізмів з ладу та виникнення аварійних ситуацій. Питання усунення динамічних навантажень не вирішене і досі, тому в даній роботі проведена оптимізація динамічних навантажень у пружних елементах (канатах) вантажопідйомних кранів при різних способах підйому вантажу: «з підхватом», «з ваги», «з землі». У якості критерію оптимізації (мінімізації вказаних навантажень) у перехідних режимах функціонування вантажопідйомного крана (пуск, гальмування, реверсування) запропонований, функціонал, який є середньоквадратичним значенням коефіцієнта динамічності на інтервалі часу, що відповідає тривалості перехідного процесу, і приймає мінімальне значення. Для розв'язку задачі оптимізації режиму руху механізму підйому вантажу використовувались методи класичного варіаційного числення. За допомогою цих методів встановлені відповідні (оптимальні) режими (закони) руху вантажу та електромеханічної системи приводного механізму підйому.

Отримані у даному дослідженні результати можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку механізмів підйому кранів з вантажем на гнучкому підвісі як на стадіях їх проектування / конструювання, так і в умовах реальної експлуатації.

Ключові слова: оптимізація, динаміка, навантаження, канати, вантажопідйомні крани, способи підйому, вантаж.

Ловейкин В.С., Човнюк Ю.В., Кадыкало И.А. «Оптимизация динамических нагрузок в упругих элементах грузоподъемных кранов при различных способах подъема груза».

Во время работы грузоподъемной техники в элементах привода и металлоконструкции возникают значительные динамические нагрузки, приводящие к ускоренному выходу элементов конструкции и механизмов из строя и возникновения аварийных ситуаций. Вопрос устранения динамических нагрузок не решен до сих пор, поэтому в данной работе проведена оптимизация динамических нагрузок в упругих элементах (канатах) грузоподъемных кранов при различных способах подъема груза «с подхватом», «с помощью веса», «с земли». В качестве критерия оптимизации (минимизации указанных нагрузок) в переходных режимах функционирования грузоподъемного крана (пуск, торможение, реверсирование) предложен, функционал, который является среднеквадратичным значением коэффициента динамичности на интервале времени, соответствующий длительности переходного процесса, и принимает минимальное значение. Для решения задачи оптимизации режима движения ме-

ханизма підйому вантажу використовувались методи класического варіаційного исчислення. С помощью этих методов установлены соответствующие (оптимальные) режимы (законы) движения груза и электромеханической системы приводного механизма подъема.

Полученные в данном исследовании результаты могут быть в дальнейшем использованы для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчета механизмов подъема кранов с грузом на гибком подвесе как на стадиях их проектирования / конструирования, так и в условиях реальной эксплуатации.

Ключевые слова: оптимизация, динамика, нагрузка, канаты, грузоподъемные краны, способы подъема, груз.

Loveykin V., Chovniuk Yu., Kadykalo I. «Optimisation of dynamic loads in elastic elements of load lifting cranes with different methods of lifting».

During the work of lifting machinery there are considerable dynamic loads in the elements of the drive and the metal structure, which lead to the rapid failure of the elements of the structure and mechanisms and emergencies. The issue of elimination of dynamic loads has not been solved yet, so in this work, the dynamic loads in the elastic elements (ropes) of load lifting cranes have been optimized within various methods of cargo lifting: “pick-up”, “using weight”, “from the ground”. As a criterion for optimization (minimization of the specified loads) in the transient modes of operation of the crane (start, brake, reversal), the functional, which takes the minimum value and is the root mean square of the dynamic coefficient at the interval of time, corresponding to the duration of the transition, is proposed. Classical variational calculus methods were used to solve the problem of optimizing the mode of motion of the lifting mechanism. With these methods, the appropriate (optimal) modes (laws) of cargo movement and the electromechanical system of the drive mechanism of lifting are established.

The results obtained in this study can be further used to refine and improve existing engineering methods for calculating lifting mechanisms of the crane with flexible suspension both at the design / construction stages and under actual operating conditions.

Keywords: optimisation, dynamics, loading, ropes, load lifting cranes, methods of lifting, cargo.

1. Постановка проблеми

Вантажопідйомні та транспортуючі машини є невід’ємним елементом (частиною) сучасного виробництва, оскільки з їх допомогою здійснюється механізація основних технологічних процесів й допоміжних робіт. У поточних й автоматизованих лініях роль підйомно-транспортних машин якісно зросла й вони стали органічною частиною технологічного обладнання, а вплив їх на техніко-економічні показники підприємства став доволі суттєвим.

Задля збільшення виробництва прогресивних засобів механізації підйомно-транспортних, навантажувально-розвантажувальних та складських робіт, у тому числі вантажопідйомних машин з дистанційним та програмним керуванням, збільшення продуктивності й покращення техніко-економічних показників підйомно-транспортних машин, підвищення їх міцності, надійності й довговічності необхідно застосовувати новітні методи розрахунку й конструювання, постійно їх уточнювати й вдосконалювати. Особливо актуальним є вирішення проблем зменшення динамічних навантажень на пружні елементи (канати) вантажопідйомних кранів, коли останні функціонують у перехідних режимах роботи (пуск, гальмування, реверсування тощо).

2. Аналіз публікацій по темі дослідження

У період неусталеного руху у механізмах підйому вантажу кранів постійно виникають динамічні навантаження коливного характеру [1]. Величина й характер цих навантажень залежать від степеня пружності з’єднуючих ланцюгів, величин і розподілу рухомих мас у системі, законів зміни зовнішніх навантажень – рушійних сил і сил опорів. Вплив навантажень на пружну систему призводить й до коливань мас, і у пружних зв’язках виникають динамічні

навантаження, особливо у механізмах пересування й повороту при різких пусках і гальмуванні. Значний внесок у розробку питань динаміки вантажопідйомних машин внесли А.А. Вайнсон [2], М.П. Александров [3,4], С.А. Казак [5], М.С. Комаров [6], М.М. Гохберг [7]. Також питанням дослідження і усунення небажаних процеів під час роботи вантажопідйомної техніки займалися закордонні та вітчизняні науковці та вчені [10-17]. У цитованих вище роботах розглянуті важливі аспекти функціонування вантажопідйомних кранів, наведені типові розрахункові схеми для моделювання динамічних процесів, що відбуваються у механізмах підйому вантажу, закріпленого на канатах, визначені динамічні коефіцієнти навантажень у пружних елементах тощо. Проте, на думку авторів даного дослідження, питанням оптимізації (мінімізації динамічних навантажень) режимів руху вантажопідйомних механізмів, що функціонують у перехідних (швидкоплинних) умовах, приділено недостатню увагу дослідників. Ці проблеми, задачі слід розв'язувати, використовуючи сучасні, науково обґрунтовані методи (наприклад, методи математичної фізики та класичного варіаційного числення), постійно уточнюючи й вдосконалюючи розрахункові схеми вказаних вище механізмів з наявними у них пружними елементами (канатами), які й приводять до виникнення небажаних коливних процесів у елементах вантажопідйомних кранів і, як наслідок, до динамічних перевантажень цих елементів й інших вузлів.

У даному дослідженні будуть частково використані результати роботи [1].

3. Постановка мети та завдання дослідження

Мета даної роботи полягає у обґрунтуванні (із використанням аналітичних методів та підходів) оптимальних режимів функціонування вантажопідйомних кранів у перехідних процесах (пуску, гальмування, реверсування) за різних способів підйому вантажу («з ваги», «з підхватом», «з землі»), які дозволяють мінімізувати протягом проміжку часу, що триває перехідний процес, динамічні навантаження у пружних елементах (канатах). Крім того, при реалізації мети роботи встановлені: 1) закони руху окремих елементів вантажопідйомного механізму крана (власне вантажу й електромеханічної системи його підйому), які відповідають заданим критеріям якості таких рухів; 2) визначені основні параметри цих режимів.

4. Виклад основного змісту дослідження

Аналіз динамічних навантажень у двомасовій пружній системі при її поступальному русі. Рушійне зусилля $P = const$.

Відомо [7], що вантажопідйомні крани (наприклад, мостові) є ведучими машинами щодо переміщення вантажів (заготовок та деталей) між технологічними операціями, тобто вони безпосередньо приймають участь у виготовленні продукції.

Динамічні навантаження і розгойдування подовжують і знижують якість виконання операцій, що значно збільшує тривалість усього виробничого процесу/циклу. На одну виробничу технологічну операцію припадає 8...10 операцій по переміщенню вантажу [8,9].

Задля розв'язку виникаючих проблем слід підвищувати ступінь автоматизації електромеханічної системи (ЕМС) крана. Це дозволить врахувати низку кінетичних параметрів, котрі впливають на динамічні навантаження і розгойдування вантажів при їх переміщенні.

Отже, для побудови раціональних/оптимальних (які мінімізують динамічні навантаження у пружних елементах механізму підйому вантажу – таких, як канати) експлуатаційних режимів вертикального переміщення вантажів ЕМС (мостового) крана слід вирішити наступні задачі: 1) розробити математичний опис технологічного процесу вертикального переміщення вантажів ЕМС (мостового) крана для заданих рушійних сил і опорів; 2) визначити кінематичні закономірності руху елементів ЕМС, котрі формують динамічні навантаження, і дослідити їх у перехідних режимах функціонування крана; 3) дати рекомендації щодо побудови раціональних/оптимальних експлуатаційних режимів керування ЕМС (мостового) крана за різних способів підйому вантажу («з ваги», «з підхватом», «з землі»).

У якості об'єкта дослідження прийнята ЕМС підйому вантажів мостовим краном типу НК 1090А, який має наступні технічні характеристики: 1) номінальна маса вантажу

$m_L = 16 \times 10^3 \text{ кг}$; 2) маса кранового мосту $m_k = 25 \times 10^3 \text{ кг}$; 3) маса візка $m_g = 6 \times 10^3 \text{ кг}$; 4) швидкість підйому вантажу $V \gg 0,33 \text{ м/с}$; 5) висота прольоту балки $h = 2,5 \text{ м}$; 6) система електроприводу – тиристорний перетворювач частоти – асинхронний електродвигун (ТПЧ – АД) з законом регулювання $U_{1m}/f_1 = \text{const}$.

Предметом дослідження є кінематичні закономірності руху вантажу і елементів ЕМС на певних етапах підйому різними способами («з ваги», «з підхватом», «з землі»).

Різні частини механізмів крана починають свій рух неодноразово. Оскільки у перший момент пуску вантаж ще не почав рухатись, а частини механізму, які обертаються, здійснюють розгін до певної швидкості (v_0), рух вантажу відбувається лише після вибору зазору (слабини канату). Ця обставина призводить до виникнення додаткових зусиль. І вантаж, і частини механізму його підйому не є абсолютно жорсткими. Додаткові зусилля призводять як до коливань ЕМС, так і самого вантажу. Наслідком коливних процесів є динамічні навантаження. При переміщенні вантажів ЕМС мостового крана повинна забезпечувати мінімум динамічних навантажень за заданої продуктивності функціонування вантажопідйомного механізму.

Відомо, що на мостових кранах найбільші динамічні навантаження виникають при підйомі «з підхватом» чи при гальмуванні [3,4,9]. Якщо цю обставину не враховувати на перших етапах підйому вантажу, тоді тривалість процесу пуску суттєво збільшується.

Спочатку розглянемо динамічні навантаження та закони руху у двомасовій системі з лінійною жорсткістю C й масами m_1 (приведена маса частин ЕМС підйому, які обертаються) та m_2 (маса вантажу).

На вказані маси діють рушійні сили P (постійні, незалежні від часу t) й сили опору Q (у вигляді сили ваги вантажу) (рис. 1). До такої системи можна привести механізми підйому, де жорсткість канатів поліспастві набагато менша жорсткості самого приводу, стрічкові та ланцюгові конвеєри та ін. [1]. Під дією зовнішніх сил у неусталений період у пружній системі (канатах) виникають коливні процеси.

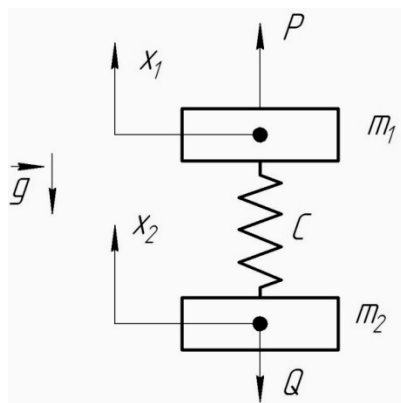


Рис. 1. – Розрахункова схема двомасової пружної системи при поступальному русі: $\vec{g}$ – прискорення вільного падіння, $Q = m_2 \cdot g$.

Диференціальні рівняння руху мас у перехідний період роботи механізму підйому вантажу (наприклад, пуску) мають вид [1]:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + C(x_1 - x_2) = P; & \ddot{x}_1 = \frac{d^2 x_1}{dt^2}; \\ m_2 \ddot{x}_2 - C(x_1 - x_2) = -Q; & \ddot{x}_2 = \frac{d^2 x_2}{dt^2}; \end{cases} \quad (1)$$

де x_1, x_2 – переміщення відповідно першої і другої мас; Q взята зі знаком мінус як сила опору.

У рівняннях (1) перші складові – сили інерції відповідної маси, другі – сили пружності у зв'язку. У правій частині рівнянь (1) – сили, діючі на систему у період неусталеного руху.

З двох рівнянь системи (1), після нескладних перетворень і введення нової змінної $x = (x_1 - x_2)$ – різниці переміщень мас, можна отримати одне диференціальне рівняння для x :

$$\ddot{x} + p^2 x = \frac{m_2 P + m_1 Q}{m_1 m_2}, \quad (2)$$

де $p = \sqrt{\frac{C(m_1 + m_2)}{m_1 m_2}}$ - кругова частота власних коливань двомасової системи, s^{-1} . Період

власних коливань T, c визначається зі співвідношення:

$$T = \frac{2\pi}{p} = 2\pi \sqrt{\frac{m_1 m_2}{C(m_1 + m_2)}}. \quad (3)$$

Загальний розв'язок (2) характеризує деформацію пружного ланцюга ($x(t)$) чи динамічне зусилля у ньому, оскільки:

$$P_{\text{динамічне}} - P_0 = C(x_1 - x_2) = Cx. \quad (4)$$

Розв'язок (2) із врахуванням (4), має вид:

$$P_0 = A \cos(pt) + B \sin(pt) + \frac{m_2 P + m_1 Q}{m_1 + m_2}. \quad (5)$$

У (5) – (A,B) – постійні інтегрування чи амплітуди коливань динамічних навантажень у канаті, для визначення котрих необхідно встановити початкові умови.

А. Якщо початкові умови: $x|_{t=0} = 0$; $\dot{x}|_{t=0} = \frac{dx}{dt}|_{t=0} = 0$, тобто фактично $P_0 = 0$, тоді:

$$A = -\frac{m_2 P + m_1 Q}{m_1 + m_2}, \quad B = 0. \quad (6)$$

Фактично такі початкові умови реалізуються для першої стадії підйому «з підхватом», коли канат ще ненапружений ($P_0 = 0$), а рух другої маси відсутній ($x_2 = \dot{x}_2 = 0$), тобто протягом вибору слабину канату. Тоді для P_0 маємо:

$$P_0 = \frac{(m_1 Q + m_2 P)}{(m_1 + m_2)} (1 - \cos pt) = P_n (1 - \cos pt), \quad (7)$$

де P_n – постійна складова навантажень, котра дорівнює сумі статичних та інерційних (від маси m_2) навантажень, і визначається за формулою:

$$P_n = \frac{(m_1 Q + m_2 P)}{(m_1 + m_2)} = n_1 Q + n_2 P, \quad (8)$$

де $n_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}$, $n_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$ – коефіцієнти розподілу мас у системі. (Тут і у подальшому прийняті позначення роботи [1]).

Для з'ясування питання, наскільки динамічні навантаження у пружних зв'язках (канатах) перевищують величину статистичних навантажень у період неусталеного руху, подамо формулу (5) (для початкових умов, згаданих вище) таким чином:

$$P_{\partial} = Q + (P - Q) \times n_2 \times (1 - \cos pt). \quad (9)$$

Максимальні значення амплітуд коливань навантаження у пружних зв'язках наступають у моменти часу t_n^* , які визначаються з наступних співвідношень:

$$\cos(pt) = -1 \quad pt_n^* = p(2n - 1), \quad n \in \mathbb{N} \quad t_n^* = \frac{p(2n - 1)}{p}. \quad (10)$$

При цьому маємо:

$$P_{\partial \max} = Q + 2 \times (P - Q) \times n_2. \quad (11)$$

Найменші навантаження у канатах будуть у моменти часу t_k^* , які визначаються з наступних співвідношень:

$$\cos(pt) = +1 \quad pt_k^* = 2p(k - 1), \quad k \in \mathbb{N} \quad t_k^* = \frac{2p(k - 1)}{p}. \quad (12)$$

При цьому для $P_{\partial \min}$ маємо:

$$P_{\partial \min} = Q. \quad (13)$$

Розмах коливань навантажень у пружних зв'язках складає:

$$A_{\text{розмаху}} = P_{\partial \max} - P_{\partial \min} = 2 \times (P - Q) \times n_2 = 2 \times (P - Q) \times \frac{m_2}{(m_1 + m_2)}. \quad (14)$$

Коефіцієнт динамічності у цьому випадку визначається за формулою:

$$k_{\partial} = \frac{P_{\partial}}{P_n} = (1 - \cos pt) = 2 \times \sin^2 \frac{apt}{2} \quad (19)$$

Залежність (15) подана на рис. 2.

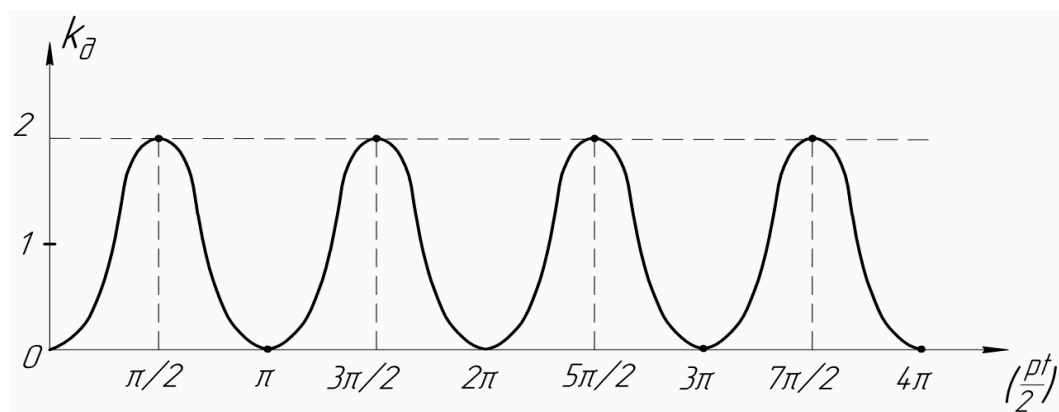


Рис. 2. – Залежність k_{∂} від t (15).

Б. Якщо початкові умови (уточнені): $x|_{t=0} = 0$; $\dot{x}|_{t=0} = V_o$, тобто фактично $P_o \neq 0$, тоді:

$$A = -\frac{m_2 P + m_1 Q}{m_1 + m_2}, \quad B = \frac{CV_o}{p}. \quad (16)$$

Фактично такі початкові умови реалізуються для першої стадії підйому «з підхватом», коли канат ще ненапружений ($P_o = 0$), а рух другої маси відсутній ($x_2 = \dot{x}_2 = 0$), тобто протягом вибору слабину канату (слід зазначити, що на відміну від випадку, розглянутого у п. А, коли $\dot{x} = 0$, $\dot{x}_2 = 0 \Rightarrow \dot{x}_1 = 0$, тобто був відсутній поступальний рух маси m_1 , у випадку п. Б – при $\dot{x}_2 = 0$ (нерухома маса m_2), $\dot{x}_1 \neq 0$, $\dot{x}_1 = V_o$, тобто існує початкова швидкість руху маси m_1 , коли вантаж (m_2) ще не почав свій рух ($\dot{x}_2 = 0$), а частини механізму ЕМС (маса m_1) які обертаються, розігнані до певної швидкості обертання і мають лінійну швидкість обертального руху V_o).

Розв'язок (2) для таких початкових умов (п. Б) має вид:

$$P_o = P_n \times (1 - \cos pt) + \frac{CV_o}{p} \times \sin pt = Q + (P - Q) \times n_2 \times (1 - \cos pt) + \frac{CV_o}{p} \times \sin pt. \quad (17)$$

Мінімальні значення навантаження у канатах будуть у моменти часу t_i^* , які визначаються з наступних співвідношень:

$$\begin{aligned} \dot{t}g(pt) &= -\frac{CV_o}{P_n \times p} \Rightarrow pt_i^* = \arctg\left(-\frac{CV_o}{P_n \times p}\right) \Rightarrow i \hat{N} \hat{U} \\ t_i^* &= \frac{\arctg\left(-\frac{CV_o}{P_n \times p}\right)}{p}. \end{aligned} \quad (18)$$

При цьому для $P_{o \min}$ маємо:

$$P_{o \min} = P_n \times \{1 - \cos(pt_i^*)\} + \frac{CV_o}{p} \times \sin(pt_i^*). \quad (19)$$

Оскільки у практичних випадках виконується нерівність:

$$P_n \gg \frac{CV_o}{p}, \quad (20)$$

тоді максимальні значення навантажень у канатах будуть у момент часу t_n^* (10) і складають:

$$P_{\partial \max} = \sqrt{P_n^2 + \frac{CV_o^2}{p}}. \quad (21)$$

Розмах коливань навантажень у пружних зв'язках визначається зі співвідношення:

$$\tilde{A}_{\text{розмаха}} = P_n \{1 - \cos(pt_i^*)\} + \frac{CV_o}{p} \sin(pt_i^*) + 2 \sqrt{P_n^2 + \left(\frac{CV_o}{p}\right)^2}. \quad (22)$$

Коефіцієнт динамічності у цьому випадку визначається за формулою:

$$k_{\partial} = (1 - \cos pt) + \frac{CV_o}{p P_n} \sin(pt). \quad (23)$$

Залежність $k_{\partial}(t)$ (23) можна подати у іншій формі:

$$k_{\partial}(t) = 1 + \sqrt{1 + \frac{CV_o^2}{p P_n}} \sin(pt - a), \quad (24)$$

$$\text{де } a = \arctg \frac{p P_n}{CV_o}.$$

Максимальні значення k_{∂} виникають у моменти (t_j^*) часу, які визначаються зі співвідношення:

$$(pt_j^* - a) = \frac{\pi}{2} + 2\pi(j-1), \quad t_j^* = \frac{1}{p} \left(\frac{\pi}{2} + 2\pi(j-1) + a \right). \quad (25)$$

При цьому маємо:

$$k_{\partial \max} = 1 + \sqrt{1 + \frac{CV_o^2}{p P_n}}. \quad (26)$$

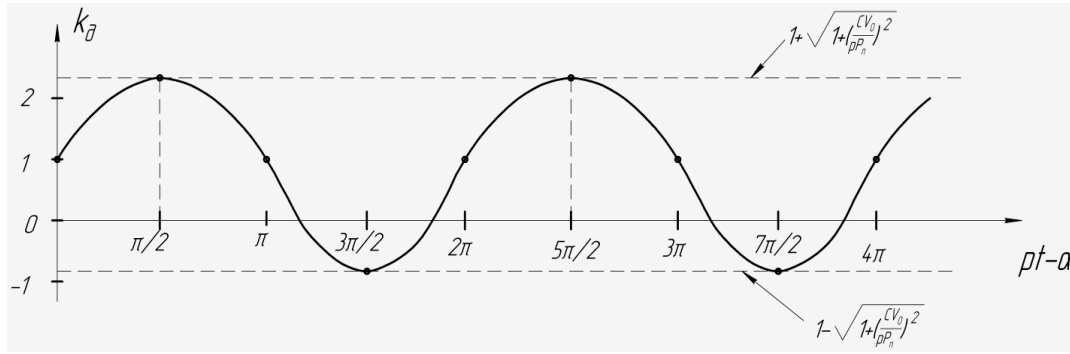
Мінімальні значення k_{∂} виникають у моменти (t_l^*) часу, які визначаються зі співвідношення:

$$(pt_l^* - a) = -\frac{\pi}{2} + 2\pi(l-1), \quad t_l^* = \frac{1}{p} \left(-\frac{\pi}{2} + a + 2\pi(l-1) \right). \quad (27)$$

При цьому маємо:

$$k_{\partial \min} = 1 - \sqrt{1 + \frac{CV_o^2}{p P_n}} + 1 < 0. \quad (28)$$

Графік залежності $k_{\partial}(t)$ (24) у випадку початкових умов п. Б наведений на рис. 3.

Рис. 3. – Залежність k_d від t (24).

В. Якщо початкові умови: $x|_{t=0} = \frac{Q}{C}$; $\dot{x}|_{t=0} = 0$, тобто фактично $P_0 \circ Q$, тоді:

$$A = -\frac{m_2 \times P_{\text{надл}}}{(m_1 + m_2)} = -n_2 \times P_{\text{надл}}; \quad P_{\text{надл}} = P - Q > 0; \quad B = 0. \quad (29)$$

Ця ситуація реалізується при підйомі вантажу «з ваги», коли до початку пуску система знаходилась під навантаженням (канати напружені, оскільки вантаж знаходиться не на опорі, і розтягнуті силою ваги маси m_2). Тоді маємо:

$$P_0 = n_1 Q + n_2 \times P - n_2 \times P_{\text{надл}} \times \cos pt = P_n - n_2 \times (P - Q) \times \cos pt \quad (30)$$

Максимальні значення амплітуд коливань навантажень у пружних зв'язках наступають у моменти часу t_n^* (10) і приймають:

$$P_{0\text{max}} = P_n + n_2 \times (P - Q) = 2n_2 P + (n_1 - n_2) \times Q \quad (31)$$

Мінімальні значення амплітуд коливань навантаження у канатах виникають у момент часу t_k^* (12). При цьому для $P_{0\text{min}}$ маємо:

$$P_{0\text{min}} = P_n - n_2 \times (P - Q) = (n_1 + n_2) \times Q. \quad (32)$$

Розмах коливань навантажень у пружних зв'язках складає:

$$\approx A_{\text{розмаху}} = P_n + n_2 \times (P - Q) - P_n + n_2 \times (P - Q) = 2n_2 \times (P - Q) = 2n_2 \times P_{\text{надл}} \quad (33)$$

Коефіцієнт динамічності у цьому випадку визначається за формулою:

$$\begin{aligned} k_d &= 1 - \frac{n_2 \times (P - Q)}{P_n} \times \cos pt = 1 - \frac{n_2 \times P_{\text{надл}}}{P_n} \times \cos pt = \\ &= 1 - \frac{n_2 \times (P - Q)}{n_1 Q + n_2 P} \times \cos pt = 1 - \frac{(n_2 P - n_2 Q)}{(n_2 P - n_1 Q)} \times \cos pt. \end{aligned} \quad (34)$$

Отже, у цьому випадку і розмах коливань і коефіцієнт динамічності менші, ніж у випадку, описаному у пункті А.

Максимальні значення k_d виникають у моменти часу t_n^* (10) і складають:

$$k_{\partial \max} = 1 + \frac{(n_2 P - n_2 Q)}{(n_2 P + n_1 Q)} = \frac{2n_2 P + (n_1 - n_2)Q}{(n_2 P + n_1 Q)}. \quad (35)$$

Мінімальні значення k_{∂} виникають у моменти часу t_k^* (12) і складають:

$$k_{\partial \min} = 1 - \frac{(n_2 P - n_2 Q)}{(n_2 P + n_1 Q)} = \frac{(n_1 + n_2)Q}{(n_2 P + n_1 Q)}. \quad (36)$$

Графік залежності $k_{\partial}(t)$ для випадку п. В початкових умов наведений на рис. 4.

(Зрозуміло, що вказані вище значення t_n^* , t_k^* , t_i^* , t_j^* повинні належати інтервалу $[0, t_p]$, де t_p – тривалість пуску/розгону системи підйому вантажу).

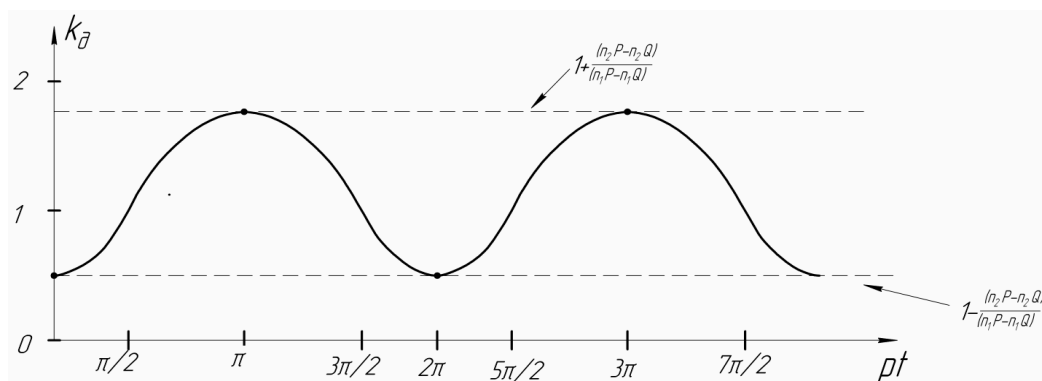


Рис. 4. – Залежність $k_{\partial}(t)$ (34).

Висновки

У межах моделі дискретними (зосередженими) параметрами встановлені закони руху механічної двомасової моделі, яка моделює функціонування механізму підйому вантажу (мостового) крана, для трьох способів підйому вантажу: а) «з підхватом», «з ваги», «з землі». Аналітично описані основні характеристики цих рухів коливного характеру: 1) амплітуда; 2) частота; 3) період; 4) коефіцієнт динамічності. Запропоновані критерії якості руху, котрі дозволяють у режимах пуску мінімізувати коефіцієнт динамічності для всіх трьох, зазначених вище, способів підйому вантажу та закони руху механічної системи, які задовольняють вказаним критеріям. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення і вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку механізмів підйому вантажу різними способами («з ваги», «з підхватом», «з землі») при функціонуванні кранів у перехідних режимах (пуску, гальмування, реверсу та ін.) і у режимах реальної експлуатації.

Список використаних джерел:

1. Расчеты грузоподъемных и транспортирующих машин / Ф. К. Иванченко, В. С. Бондарев, Н. П. Колесник [и др.]. – Киев : Вища школа, 1978. – 756 с.
2. Вайнсон А. А. Строительные краны / А. А. Вайнсон. – М. : Машиностроение, 1970. – 488 с.
3. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины / М. П. Александров. – - 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1972. – 504 с.
4. Грузоподъемные машины : учеб. пособие по специальности "Подъемно-трансп. машины и оборудование" / под общ. ред. проф. М. П. Александрова. – М. : Высшая школа, 1973. – 472 с.
5. Казак С. А. Динамика мостовых кранов / С. А. Казак. – М. : Машиностроение, 1968. – 332 с.
6. Комаров М. С. Динамика механизмов и машин / М. С. Комаров. – М. : Машиностроение, 1968. – 295 с.

7. Гохберг М. М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин / М. М. Гохберг. – М. : Машиностроение, 1969. – 520 с.
8. Березниченко З. А. Разработка рациональных режимов управления электромеханической системой мостового крана / З. А. Березниченко, Н. В. Клименкова, С. В. Лагуненков / Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2012. – № 4 (29). – С. 6-11.
9. Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, А. А. Лещев. – Одесса : СМІЛ, 2008. – 192 с.
10. Александров М. П. Динамика грузоподъемных кранов / М. П. Александров. – М. : Машиностроение, 1986. – 400 с.
11. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М. : АСТ : Астрель, 2006. – 991 с.
12. Патент 27558 Україна Спосіб вертикального переміщення вантажів краном / Клімченкова Н. В., Спаська А. М. ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u200705695; заявл. 23.05.07; опубл. 12.11.2007, Бюл. №18. – 6 с.
13. Ловейкін В. С. Аналіз умов існування стаціонарних режимів (автоколивань) при роботі мостових кранів / В. С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, І. О. Кадикало // Підйомно-транспортна техніка. – 2016. – Вип. 3. – С. 4-15.
14. Ловейкін В. С. Динамічна оптимізація вантажопідйомних механізмів кранів при підйомі вантажу «з підхватом» / В.С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, І. О. Кадикало // Научный вестник ДГМА. – 2016. – Вип. 2 (20Е). – С. 90-98.
15. Ловейкин В. С. Уточненный анализ и минимизация динамических нагрузок в упругих элементах грузоподъемных машин / В. С. Ловейкин, Ю. В. Човнюк, И. А. Кадыкало // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 21. – С. 354-361.
16. Григоров О. В. Вантажопідйомні машини : навч. посіб. / О. В. Григоров, О. В. Петренко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – 304 с.
17. Lee H. P. Dynamic response of a beam with a moving mass / H. P. Lee // Journal of Sound and Vibration. – 1996. – Vol. 191 (2). – Pp. 289-294.

References

1. Yvanchenko, F, Bondarev, V, Kolesnyk, N & Barabanov, V 1978, Raschety gruzopodemnyh i transportirujushhih mashin, Vishha shkola, Kiev.
2. Vajnsn, AA 1970, Stroitelnye krany, Mashinostroenie, Moskva.
3. Aleksandrov, MP 1972, Podemno-transportnye mashiny, 4th edn, Vysshaja shkola, Moskva.
4. Aleksandrov, MP (ed.) 1973, Gruzopodemnye mashiny, Vysshaja shkola, Moskva.
5. Kazak, S 1968, Dinamika mostovyh kranov, Mashinostroenie, Moskva.
6. Komarov, M 1968, Dinamika mehanizmov i mashin, Mashinostroenie, Moskva.
7. Gohberg, MM 1969, Metallicheskie konstrukcii podemno-transportnyh mashin, Mashinostroenie, Moskva.
8. Bereznichenko, ZA, Klimchenkova, NV Lagunenkov, SV 2012, 'Razrabotka racionalnyh rezhimov upravlenija jelektromehanicheskoy sistemoj mostovogo krana', Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii, no. 4 (29), pp. 6-11.
9. Gerasimjak, RP & Leshhev, AA 2008, Analiz i sintez kranovyh jelektromehanicheskikh sistem, SMIL, Odessa.
10. Aleksandrov, MP 1986, Dinamika gruzopodemnyh kranov, Mashinostroenie, Moskva.
11. Vygodskij, MJa 2006, Spravochnik po vysshej matematike, AST, Astrel, Moskva.
12. Klimchenkova, NV & Spaska, AM 2007, Sposib vertykalnoho peremishchennia vantazhiv kranom, UA Patent 27558.
13. Loveikin, VS, Chovniuk, YuV & Kadykalo, IO 2016, 'Analiz umov isnuvannia statsionarnykh rezhymiv (avtokolyvan) pry roboti mostovykh kraniv', Pidimno-transportna tekhnika, iss. 3, pp. 4-15.
14. Loveikin, VS, Chovniuk, YuV & Kadykalo, IO 2016, 'Dynamichna optymizatsiia vantazhopidimnykh mekhanizmv kraniv pry pidimi vantazhu z pidkhvatom', Nauchnyj vestnik Donbasskoj gosudarstvennoj mashinostroitelnoj akademii, iss. 2 (20E), pp. 90-98.
15. Loveikin, VS, Chovniuk, YuV & Kadykalo, IO 2016, 'Utochnennyj analiz i minimizacija dinamicheskikh nagruzok v uprugih jelementah gruzopodemnyh mashin', Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta, Geologija. Neftegazovoe i gornoe delo, vol. 15, no. 21, pp. 354-361.
16. Hryhorov, OV & Petrenko, OV 2006, Vantazhopidimni mashyny, Natsionalnyi tekhnichniyi universytet «Kharkivskiy politekhnichniyi instytut, Kharkiv.
17. Lee, HP 1996, 'Dynamic response of a beam with a moving mass', Journal of Sound and Vibration, vol. 191 (2), pp. 289-294.

Стаття надійшла до редакції 4 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-17-23
УДК 620.863

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ТРЬОХШАРОВОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ

©Фідровська Н.М.¹, Слепужніков Є.Д.², Перевозник І.А.³

Харківський національний автомобільно-дорожній університет¹

Національний університет цивільного захисту України²

Харківський державний автомобільно-дорожній коледж³

Інформація про авторів:

Фідровська Наталія Миколаївна: ORCID: 0000-0002-5248-273X; nfidrovsraya@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

Перевозник Ігор Анатолійович: ORCID: 0000-0002-4278-523X; igorperevoznik1970@gmail.com; аспірант, завідувач навчальної лабораторії технічних засобів навчання; Харківський державний автомобільно-дорожній коледж; вул. Котельниківська, 3, м. Харків, 61051, Україна

В статті розглянутий напружений стан трьохшарової циліндричної конструкції з урахуванням енергії зсуву заповнювача. В трьохшаровій конструкції два зовнішні шари з'єднані за допомогою заповнювача, який має меншу міцність у порівнянні до зовнішніх шарів. Заповнювач забезпечує пружні властивості оболонки і працює на передачу зовнішнього тиску на зовнішні шари і поперечних зусиль зсуву.

Жорсткість у трьохшарових конструкцій значно вища, ніж у суцільних металевих конструкціях. Крім того, вони витримують і більші навантаження, які виникають при прикладенні зовнішніх навантажень.

В залежності від модулю пружності заповнювача у поперечному напрямку в трьохшарових конструкціях можуть виникати і поперечні деформації.

В статті було розглянуто рівняння змінення кривизни окремого кільця у випадку, коли навантаження на оболонку розподілено впродовж однієї твірної і визначені нормальні напруження в площі симетрії при $x = 0$.

При проведенні розрахунків були використані гіпотези про відсутність розтягнення кілець відносних деформацій в окружному напрямку та відсутності зсуву серединної поверхні.

Був складений вираз для потенціальної енергії і за допомогою рівняння Ейлера варіаційної задачі отримано лінійне неоднорідне диференціальне рівняння четвертого ступеню. Після вирішення цього рівняння аналітичним методом було отримана залежність для радіальних переміщень, що дає змогу визначати окружні і нормальні напруження в циліндричній оболонці.

Отримане в науковому дослідженні рішення задачі міцності трьохшарової циліндричної конструкції дозволяє визначити напруження в оболонці в залежності не тільки від геометричних її параметрів, але і модулю зсуву заповнювача, що покращує достовірність проектування і експлуатацію таких конструкцій, що дає певні рекомендації по її використанню.

Ключові слова: циліндрична оболонка, напруження, міцність, енергія зсуву, заповнювач, кривизна.

Фидровская, Н.Н., Слепужников Е.Д., Перевозник И.А. «Определение прочности трехслойной цилиндрической оболочки».

В статье рассмотрено напряженное состояние трехслойной цилиндрической конструкции с учетом энергии сдвига заполнителя. В трехслойной конструкции два внешних слоя соединены с помощью заполнителя, который имеет меньшую прочность в сравнении с внешними слоями. Заполнитель обеспечивает упругие свойства оболочке и работает на передачу внешнего давления на внешние слои и поперечных усилий сдвига.

Жесткость трехслойной оболочки значительно выше, чем в сплошных металлических конструкциях. Кроме того, они выдерживают и большие нагрузки, которые возникают при действии внешних сил.

В зависимости от модуля упругости заполнителя в поперечном направлении в трехслойных конструкциях могут возникать и поперечные деформации.

В статье было рассмотрено уравнение изменение кривизны отдельного кольца в случае, когда нагрузка на оболочку распределена вдоль одной направляющей и определены нормальные напряжения в плоскости симметрии при $x = 0$.

При проведении расчетов были использованы гипотезы про отсутствие растяжения колец относительных деформаций в окружном направлении и отсутствия сдвига серединой поверхности.

Было составлено выражение для потенциальной энергии и с помощью уравнения Эйлера вариационной задачи получено линейное неоднородное дифференциальное уравнение четвертой степени. После решения этого уравнения аналитическим методом была получена зависимость для радиальных перемещений, что дает возможность получить окружные и нормальные напряжения в цилиндрической оболочке.

Полученные в научном исследовании решения задачи прочности трехслойной цилиндрической конструкции позволяет определить напряжения в оболочке не только в зависимости от геометрических ее параметров, но и модуля сдвига заполнителя, что повышает достоверность проектирования и эксплуатацию таких конструкций и дает определенные рекомендации по ее использованию.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка; напряжения; прочность; энергия сдвига; заполнитель; кривизна.

Fidrovsk N., Slepugnikov E., Perevoznic I. «Definition of durability of cylinder three layer design».

In the article consideration strained condition of three layer cylinder design with calculation of energy displacement fill in. In three layer design two outward layer united with help fill in, which have lesser durability as compared with outward layer. Full in securing elastic property of cylinder and work on transmission outward pressure on outward layer and cross-section effort of displacement. Hardness three layer design considerable higher than in unbroken metallic design. Besides that they stand and large loading, which arise in the time of action outward forces.

In dependent on modulus elasticity of full in diametrical direction in three layer design can be arise and diametrical strains.

In the article consideration the equation change of crookedness separate ring in case when loading on cylinder distribute along one direction and define normal strain in the plan symmetry by $x = 0$.

In the time of conduct calculations use hypothesis of absence stretching of rings relative strains in district direction and absence of displacement the middle plan.

Was composite expression for potential energy and with help the equation Eyler of the variation problem receive long inhomogeneous differential equation forth power. After decision this equation of analyst method was receive dependence for radial transference, what let possibility to receive district and normal strains in cylinder.

Acknowledge the receipt in scientific research decision equation of durability three layer design allow to receive strains in cylinder not only in dependence from geometrical its parameters but and of modulus displacement outward layer, what rise reliable project and exploitation so design and give definite recommendations for use.

Keywords: cylinder casing; strain; durability; energy of displacement; outward layer; crookedness.

Вступ.

У різних галузях техніки, таких як авіабудування, судобудування будівництво та інші знаходять застосування багатошарові конструкції, в основному трьохшарові пластини та оболонки. Трьохшарова конструкція складається з двох міцних зовнішніх шарів, які з'єднані за допомогою заповнювача. Заповнювачем являється матеріал, який має меншу міцність, ніж зовнішні шари, але забезпечує пружні властивості оболонці або пластинці. Розвиток хімічної промисловості дозволяє в якості матеріалів зовнішніх шарів і заповнювача використовувати склопластики і епоксидні смоли.

Огляд рішень, які мають місце.

Трьохшаровими оболонками займалися багато відомих вчених, таких як С.А.Амбарцумян [1], К.З.Галімов [2], Е.І. Григолюк [3], П.М.Огібалов [4], С.Н.Кан [5], І. Солвей [6], Л.Донелл [7]. При будівництві рівнянь для зовнішніх шарів використовують гіпотези Кірхгофа-Лява, для середнього шару – заповнювача – гіпотеза про заповнювача трьохшарові оболонки можуть бути з легким і жорстким заповнювачем. Для легкого заповнювача відношення модуля пружності зовнішнього шару до модуля пружності заповнювача складає $10^2 - 10^4$. Зовнішні шари беруть на себе все навантаження на стиск-розтягнення. Заповнювач працює на передачу нормального тиску на зовнішні шари і поперечних зусиль зсуву. В залежності від модуля пружності заповнювача у поперечному напрямку в трьохшарових конструкціях можуть виникати і поперечні деформації.

Постановка проблеми

Трьохшарові оболонки мають якості, які відсутні у суцільних металевих конструкціях. Вони мають високу жорсткість і можуть витримувати більші питомі навантаження.

Мета – провести аналітичні дослідження, які визначать дійсні навантаження і трьохшарових циліндричних оболонках.

Виклад основного матеріалу

Якщо оболонка має декілька шарів, то при її розрахунку треба обов'язково враховувати енергію зсуву заповнювача.

Сумарні моменти згину будемо розглядати у вигляді [5]

$$m_f = m_{f_0} + m_{f_{\text{dod}}} = x(x)b(f), \quad (1)$$

де задані $m_{f_0} = x_0(x)b(f)$,

$x(x)$ – статично невизначена функція, яка змінна вдовж оболонки.

В цьому випадку змінюється залежність (при $m=0$)

$$m_t = - \frac{D_t}{R^2} \frac{\partial^2 w_n}{\partial f^2} + w_n \frac{\partial}{\partial f} \quad (2),$$

де w_n – загальні значення радіальних переміщень

$$w_n = w_0 + w_{\text{dod}} = x(x) b(f)$$

Це пояснюється тим, що у випадку трьохшарової оболонки кривизна оболонки c_t проходить не тільки за рахунок дії моментів згину m_t , але і внаслідок впливу поперечних сил Q_t , які викликають дотичні напруження заповнювача

$$t = \frac{Q_t}{F},$$

де $F = h$ – товщина заповнювача.

Рівняння змінення кривизни окремого кільця представимо у вигляді

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w_n}{\partial f^2} + w_n \frac{\partial}{\partial f} = - \frac{\partial m_t}{\partial D_t} + \frac{p_0}{G_{\text{zap}} F} \frac{\partial}{\partial f} \quad (3)$$

де $p_0 = - \frac{1}{R} \frac{\partial Q_t}{\partial f}$ – інтенсивність радіального навантаження,

$\frac{p_0}{G_{\text{zap}} F}$ – зміна кривизни кільця в наслідок зсуву заповнювача.

Розглянемо випадок коли навантаження на оболонку розподілене вдовж однієї твірної при $f=0$. В площині симетрії при $x=0$ нормальні напруження визначаються за формулою

$$s_{x_0} = \frac{M_z}{J_z} y = \frac{pL^2}{8pR^3d} R \cos f = 0,04 \frac{p \partial L}{d \partial R} \frac{\partial}{\partial f} \cos f \quad (4)$$

Момент згину в довільному перетині кільця одиничної ширини від дії навантаження p і дотичних сил

$$m_{t_0} = \frac{pR}{2p} \left[1 + 0,5 \cos f - (p-f) \sin f \right] \quad (5)$$

З урахуванням залежності (5) рівняння (3) приймає вигляд

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial f^2} + w \frac{\partial}{\partial f} = x(x) \left[\frac{1 + 0,5 \cos f + (p-f) \sin f}{G_{\text{zap}} R^2 F} - \frac{1 + 0,5 \cos f - (p-f) \sin f}{D_t} \right] \quad (6)$$

Після вирішення рівняння (6) отримаємо вираз для радіальних переміщень

$$w_n = R^2 x(x) \left[\frac{1}{D_t} \left(0,5p \cos f - 0,75 \sin f + 0,25f \cos f \right) - 1 \right] + \frac{1}{G_{\text{zap}} R^2 F} \left(0,25f \cos f + 0,25 \sin f - 0,5p \cos f \right) \quad (7)$$

На основі гіпотези про відсутність розтягнення кілець відносних деформацій в окружному напрямку дає змогу знайти переміщення V_n по дотичній до дуги S

$$e_f = \frac{w_n}{R} + \frac{1}{R} \frac{\nabla v_n}{\nabla f} = 0$$

$$v_n = -R^2 x(x) \left\{ \frac{1}{D_t} \frac{\partial}{\partial f} \sin f (0,25f^3 + 0,5pf^2 - 0,5f - 2) + \right.$$

$$\left. + f \cos f (1,25f + 0,5p) - f \right\} + \frac{1}{G_{zap} R^2 F} \frac{\partial}{\partial f} f^2 \cos f +$$

$$+ 0,25 \sin f (f^3 - 2pf^2 + f - 2) \left. \right\}. \quad (8)$$

Гіпотеза відсутності зсуву серединної поверхні дає можливість знайти зв'язок між переміщеннями u_n по осі x і переміщеннями v_n по дотичній до дуги S

$$\frac{\nabla u_n}{R \nabla f} + \frac{\nabla v_n}{\nabla x} = 0$$

$$u_n = R^3 \frac{\nabla x}{\nabla x} \left\{ \frac{1}{G_{zap} R^2 F} \frac{\partial}{\partial f} \sin f (f^3 - 2,82f - 1) + 0,25 \cos f (f^4 - 11f^2 - 2pf + 2) \right\} -$$

$$- \frac{1}{D_t} \frac{\partial}{\partial f} (0,5f^2 + \sin f (2f^3 + 0,5pf^2 - 0,68f + 1) -$$

$$- \cos f (0,25f^4 + 1,32f^2 - 0,5pf - 0,5) \left. \right\}. \quad (9)$$

Змінення кривизни серединної поверхні в напрямку твірної

$$c_x = - \frac{\nabla^2 w_n}{\nabla x^2},$$

$$c_x = -R \frac{\nabla^2 x}{\nabla x^2} \left\{ \frac{1}{D_t} \frac{\partial}{\partial f} \cos f (0,5p + f) - 0,75f \sin f - 1 \right\} +$$

$$+ \frac{0,25}{G_{zap} R^2 F} \frac{\partial}{\partial f} \cos f (2p + f) + f \sin f \left. \right\}.$$

Змінення кривизни серединної поверхні в окружному напрямку

$$c_f = - \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w_n}{\partial f^2} + w_n \frac{\partial}{\partial f},$$

$$c_f = -x(x) \left\{ \frac{1}{G_{zap} R^2 F} \frac{\partial}{\partial f} \cos f + \sin f (p - f) \right\} -$$

$$- \frac{1}{D_t} \frac{\partial}{\partial f} \cos f + \sin f (p + f) + 1 \left. \right\}.$$

Додаткові нормальні напруження

$$s_{xdod} = E \frac{\nabla u_n}{\nabla x} = ER^3 \frac{\nabla^3 x}{\nabla x^3} \left\{ \frac{1}{G_{zap} R^2 F} \frac{\partial}{\partial f} \sin f (f^3 - 2,82f - 1) + \right.$$

$$+0,25 \cos f \left(f^4 - 11f^2 - 2pf + 2 \right) - \frac{1}{D_t} \sin f \left(2f^3 + 0,5pf^2 - 0,68f + 1 \right) + \\ + 0,5f^2 - \cos f \left(0,25f^4 + 1,32f^2 - 0,5pf - 0,5 \right) \Big] \Big\}$$

Складаємо вираз для потенціальної енергії

$$G = \frac{1}{2} m_f c_f + \frac{d_{n,cp}}{2} s_{xdod} e_x - m_{f0} c_f \dot{u} R df \quad (10)$$

Підставляємо відповідні вирази і отримаємо

$$G = E \frac{1}{2} x^2(x) \ddot{x} - \frac{33266,89}{G_{zap} R^4 F^2} - \frac{58923}{D_t^2} \dot{x} - \frac{x^2(x)}{R} \frac{33,43}{D_t} - \frac{2,28}{G_{zap} R^2 F} \ddot{x} - \\ - \frac{p}{2p R} \frac{103,2}{D_t} - \frac{39,71}{G_{zap} R^2 F} \ddot{x}$$

Рівняння Ейлера варіаційної задачі

$$\frac{1}{x(x)} \frac{d}{dx} \frac{1}{x(x)} \frac{d}{dx} \frac{1}{x(x)} \ddot{x} - \frac{d^2}{dx^2} \frac{1}{x(x)} \ddot{x} = 0$$

Це приводить до лінійного неоднорідного диференційного рівняння четвертого ступеню відносно функції $x(x)$

$$\frac{1}{x^4} x^{(4)} + 4k_n x(x) = k p(x) \quad (11)$$

$$\text{де } k_n = \frac{\frac{2,28}{G_{zap} R^2 F} - \frac{33,44}{D_t} \ddot{x}}{R E \frac{33266,89}{G_{zap} R^4 F^2} - \frac{58923}{D_t^2} \ddot{x}}, \\ k = \frac{\frac{103,2}{D_t} - \frac{39,71}{G_{zap} R^2 F} \ddot{x}}{2p R^2 E \frac{33266,89}{G_{zap} R^4 F^2} - \frac{58923}{D_t^2} \ddot{x}}$$

Рішенням рівняння (11) буде вираз

$$x(x) = e^{-k_n x} (C_1 \sin k_n x + C_2 \cos k_n x) + e^{k_n x} (C_3 \sin k_n x + C_4 \cos k_n x) + x_{hast} \quad (12)$$

Висновки

Отримане рішення задачі міцності трьохшарової циліндричної конструкції дозволяє визначити напруження в оболонці в залежності не тільки геометричних її параметрів, але і модулю зсуву заповнювача, що покращує достовірність проектування і експлуатацію таких конструкцій.

Список використаних джерел:

1. Амбарцумян С. А. Теория анизотропных пластин / С. А. Амбарцумян // М. : Физматгиз, 1967. – 266 с.
2. Галимов К. З. О работах казанских ученых по теориям пластин и оболочек / К. З. Галимов, Р. Г. Суркин // Исследования по теории пластин и оболочек. – 1967. – № 5. – С. 3-55.
3. Григолюк Э. И. Уравнения трехслойных оболочек с легким заполнителем / Э. И. Григолюк // Изв. АН СССР, ОТН. – №1. – 1957. – С. 77-84.
4. Огибалов П. М. Оболочки и пластины / П. М. Огибалов, М. А. Колтунов. – М. : МГУ, 1969. – 696 с.
5. Solvey I. Bibliography and summaries of sandwich construction (1939-1954) / Aeronaut/ Res. Lab., Melbourne, Austral, AR/ SM 2, 1953.
6. Кан С. Н. Строительная механика оболочек / С. Н. Кан. – М. : Машиностроение, 1966. – 508 с.
7. Донелл Л. Г. Балки, пластины и оболочки / Л. Г. Донелл. – М. : Наука, 1982. – 568 с.

References

1. Ambarcumjan, SA 1967, Teorija anizotropnyh plastin, Fizmatgiz, Moskva.
2. Galimov, KZ & Surkin, RG 1967, 'O rabotah kazanskih uchenyh po teorijam plastin i obolochek', Issledovanija po teorii plastin i obolochek, no. 5, pp. 3-55.
3. Grigoljuk, JeI 1957, 'Uravenija trehslojnyh obolochek s legkim zapolnitelem', Izvestija Akademii nauk SSSR. Otdelenie tehniceskikh nauk, no. 1, pp. 77-84.
4. Ogibalov, PM & Koltunov, MA 1969, Obolochki i plastiny, Moskovskij gosudarstvennyj universitet, Moskva.
5. Solvey, I 1953, 'Bibliography and summaries of sandwich construction (1939-1954)', Aeronaut, Melbourne, AR/ SM 2.
6. Kan, SN 1966, Stroitel'naja mehanika obolochek, Mashinostroenie, Moskva.
7. Donell, LG 1982, Balki, plastiny i obolochki, Nauka, Moskva.

Стаття надійшла до редакції 7 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-24-32

УДК 621.914

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ТОЧЕНИИ И УСЛОВИЯ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ

©Полянский В. И.

НПО «Империя металлов», г. Харьков

Информация об авторе:

Полянский Владимир Иванович – ORCID: 0000-0001-54482-9955; fokusnic1@gmail.com; кандидат технических наук, Генеральный директор, НПО «Империя металлов», Григоровское шоссе, 88, г. Харьков, 61020, Украина

Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании и точении на основе представления снимаемого припуска в виде пакета элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые перерезаются режущим инструментом в процессе обработки. Такой подход к расчету температуры резания позволяет с единых позиций оценить технологические возможности процессов шлифования и точения и научно обоснованно подойти к выбору наиболее эффективного метода финишной механической обработки деталей машин. Показано, что при шлифовании расхождение расчетных и экспериментальных значений температуры резания небольшое – в пределах 10 %. При точении это расхождение увеличивается до 2 раз и более, что снижает точность расчетов. Установлено, что причиной такого большого расхождения является периодический (дискретный) характер перерезания режущим инструментом элементарных прямолинейных адиабатических стержней. Исходя из этого, для более точного расчета температуры резания при точении учтено количество перерезаний адиабатического стержня, т.е. количество элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания. Подвод тепла к элементарному прямолинейному адиабатическому стержню рассматривался дискретно изменяющимся во времени. В результате выполненных расчетов установлено, что в этом случае температура резания при точении уменьшается приблизительно в 2 раза, а это приводит в соответствие теорию и практику механической обработки. Также установлено, что чем меньше количество элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания, тем меньше температура резания. Например, при осуществлении точения с минимально возможным количеством элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания, равным 2, температура резания может быть уменьшена до 10 раз.

Ключевые слова: механическая обработка; резец; шлифовальный круг; условное напряжение резания; качество обработки; производительность обработки.

Полянський В. І. «Порівняльний аналіз температури різання при шліфуванні та точінні й умови її зменшення»

Наведено аналітичні залежності для визначення температури різання при шліфуванні та точінні на основі подання припуску, що знімається, у вигляді пакету елементарних прямолінійних адіабатичних стрижнів, які перерізаються різальним інструментом в процесі обробки. Такий підхід до розрахунку температури різання дозволяє з єдиних позицій оцінити технологічні можливості процесів шліфування та точіння й науково обґрунтовано підійти до вибору найбільш ефективного методу фінішної механічної обробки деталей машин. Показано, що при шліфуванні розбіжність розрахункових і експериментальних значень температури різання незначна – в межах 10 %. При точінні ця розбіжність збільшується до 2 разів і більше, що знижує точність розрахунків. Встановлено, що причиною такої великої розбіжності є періодичний (дискретний) характер перерізання різальним інструментом елементарних прямолінійних адіабатичних стрижнів. Виходячи з цього, для більш точного розрахунку температури різання при точінні враховано кількість перерізів адіабатичного стрижня, тобто кількість елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання. Підведення тепла до елементарного прямолінійного адіабатичного стрижня розглядалося дискретно змінюваним в часі. В результаті виконаних розрахунків встановлено, що в цьому випадку температура різання при точінні зменшується приблизно в 2 рази, а це приводить у відповідність теорію та практику механічної обробки. Також встановлено, що чим менше кількість елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання, тим менше температура різання. Наприклад, при здійсненні точіння з мінімально можливою кількістю елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання, рівною 2, температура різання може бути зменшена до 10 разів.

Ключові слова: механічна обробка, різець, шліфувальний круг, умовне напруження різання, якість обробки, продуктивність обробки.

Polyansky V. «A comparative analysis of the cutting temperature during grinding and turning and the conditions for its reduction»

Analytical dependences are given for determining the cutting temperature during grinding and turning based on the representation of the removed allowance in the form of a package of elementary straight-line adiabatic rods that are cut by a cutting tool during processing. Such an approach to calculating the cutting temperature makes it possible to evaluate technological capabilities of grinding and turning processes from a single point of view and scientifically substantiate the choice of the most effective method of finishing machining of machine parts. It is shown that during grinding the discrepancy between the calculated and experimental values of the cutting temperature is small - within 10%. When turning, this discrepancy increases to 2 times or more, which reduces the accuracy of the calculations. It is established that the reason for such a large discrepancy is the periodic (discrete) nature of the cutting by the cutting tool of elementary

rectilinear adiabatic rods. Based on this, for a more accurate calculation of the cutting temperature during turning, the number of cuts of the adiabatic core, i.e. the number of elementary volumes of the processed material generated during the passage of the cutter cutting zone. The heat supply to the elementary rectilinear adiabatic rod was considered discretely varying in time. As a result of the calculations, it was found that in this case, the cutting temperature during turning decreases by about 2 times, and this brings the theory and practice of machining in line. It was also established that the smaller the number of elementary volumes of the processed material generated during the passage of the cutting zone by the cutter, the lower the cutting temperature. For example, when turning with the smallest possible number of elementary volumes of the processed material generated during the passage of the cutting zone by the cutter equal to 2, the cutting temperature can be reduced to 10 times.

Keywords: mechanical processing; cutter; grinding wheel; conditional cutting voltage; processing quality; processing performance

Введение

Повышение качества и производительности механической обработки являются важнейшими задачами создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Поэтому применение в производстве современных металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и прогрессивных сборных режущих лезвийных твердосплавных и керамических инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства открывает широкие перспективы решения поставленных задач. Однако выбор наиболее эффективных методов механической обработки конкретных деталей в основном производится интуитивно на основе практического опыта технолога, что не всегда оказывается оправданным. Это связано с отсутствием в настоящее время теоретических технологических решений, необходимых для правильного выбора рациональных методов механической обработки. В особой мере это относится к теплофизическим решениям, которые не позволяют в полном объеме провести сравнение температуры резания для таких методов окончательной обработки как шлифование и точение и выбрать наиболее эффективный метод. Поэтому в работе решается актуальная задача дальнейшего развития математических моделей тепловых процессов при механической обработке для научно обоснованного определения условий уменьшения температуры резания и повышения эффективности обработки.

1. Анализ последних исследований и публикаций

Математическому моделированию температуры резания при механической обработке посвящены работы [1–3]. Однако в них для решения сложного дифференциального уравнения теплопроводности принято нулевое значение температуры резания на бесконечном удалении от действия теплового источника. Это ограничивает возможность определения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, которая должна

принимать не бесконечное, а конечное значение. Поэтому важно определить температуру резания при шлифовании и точении с учетом конечного значения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали и на этой основе уточнить известные теплофизические решения. Это позволит научно-обоснованно подойти к установлению условий уменьшения температуры резания при шлифовании и точении.

2. Постановка проблемы

В работе [4] предложена расчетная схема температуры резания при шлифовании (рис. 1), позволяющая глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали рассматривать конечной величиной.

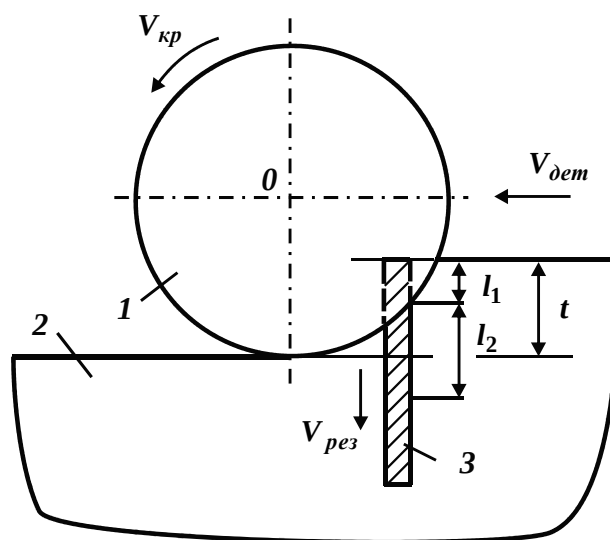


Рис. 1 – Расчетная схема определения температуры резания при плоском шлифовании: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень (l_1 – длина срезанной части адиабатического стержня; l_2 – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали; $V_{кр}$ – скорость круга)

Для этого снимаемый припуск представлен пакетом элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые при шлифовании перерезаются шлифовальным кругом и по которым образующееся при резании тепло уходит в поверхностный слой обрабатываемого материала вследствие его теплопроводности. В пределах глубины шлифования тепловой поток перемещается вдоль адиабатического стержня с постоянной скоростью $V_{рез}$, равной скорости перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом, движущимся равномерно со скоростью $V_{дет}$ вдоль обрабатываемой детали. Исходя из такого представления процесса резания, необходимо определить температуру резания при шлифовании и точении и научно обоснованно подойти к выбору наиболее эффективного метода финишной механической обработки деталей машин.

4. Целью исследования является теоретическое обоснование условий уменьшения температуры резания при шлифовании и точении и разработка практические рекомендации по повышению эффективности механической обработки.

5. Изложение основного материала

Исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 1, установлена аналитическая зависимость для определения температуры резания q при шлифовании [5, 6]:

$$q = \frac{q_{\max}}{e^{\frac{c \times \gamma_{\text{рез}}^2 \times t}{l}}} \quad (1)$$

где $q_{\max} = S / (c \times \gamma)$ – максимальная температура резания, град; S – условное напряжение резания, Н/м²; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град); γ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; l – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град); t – время перерезания элементарного прямолинейного адиабатического стержня, с.

При шлифовании $t = t / V_{\text{рез}}$; $V_{\text{рез}} = V_{\text{дет}} \times \sqrt{0,5 \times t / R_{\text{кр}}}$, где t – глубина шлифования, м; $R_{\text{кр}}$ – радиус шлифовального круга, м. Зависимость (1) применима и при точении, рассматривая $t = a / V_{\text{рез}}$; $V_{\text{рез}} = V \times \tan b$, где a – толщина среза, м; V – скорость резания, м/с; b – условный угол сдвига обрабатываемого материала. В итоге показатель степени числа $e \gg 2,72$ в правой части зависимости (1) равен: при шлифовании – $(c \times \gamma / l) \times V_{\text{дет}} \times \sqrt{0,5 \times t / R_{\text{кр}}}$; при точении – $(c \times \gamma / l) \times a \times \tan b$.

Выполненные расчеты температуры резания q при шлифовании на основе зависимости (1) показали на достаточно высокую степень ее сходимости с экспериментальными данными (расхождение в пределах 10 %). При точении стальных заготовок имеет место расхождение расчетных и экспериментальных значений температуры резания q до 2 раз и более, что снижает точность расчетов. Причиной этому является периодический (дискретный) характер перерезания режущим инструментом элементарных прямолинейных адиабатических стержней (рис. 1), который не учитывается в расчетах.

Процесс шлифования осуществляется с относительно небольшой скоростью детали $V_{\text{дет}}$ и соответственно небольшой скоростью перерезания элементарного прямолинейного адиабатического стержня шлифовальным кругом $V_{\text{рез}}$ (рис. 1). Поэтому формирование температуры резания q происходит фактически в условиях непрерывного характера перерезания шлифовальным кругом элементарных прямолинейных адиабатических стержней. Следовательно, расчет температуры резания q при шлифовании на основе зависимости (1) можно

производить без учета периодического (дискретного) характера перерезания шлифовальным кругом элементарных прямолинейных адиабатических стержней.

При точении, во-первых, скорость резания V значительно больше скорости детали $V_{дет}$ при шлифовании. Во-вторых, больше толщина среза и толщина элементарного объема материала, отделяемого от основной массы материала в результате его сдвиговой деформации. В результате значительная часть выделяющегося при резании тепла постоянно уносится образующейся стружкой. Это принципиально изменяет закономерности формирования температуры резания q при точении и, естественно, приводит к ее уменьшению. Поэтому расчет температуры резания q при точении на основе зависимости (1) должен отличаться от аналогичного расчета, выполняемого при шлифовании. Для этого необходимо полученные расчетные значения температуры резания q уменьшать в зависимости от количества перерезаний адиабатического стержня n , т.е. в зависимости от количества элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания. В табл. 1 приведены рассчитанные на основе зависимости (1) значения отношения q / q_{max} , принимая для обрабатываемого материала – стали 45 коэффициент температуропроводности $l / (c \times \rho) = 8 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $t = 0,824 \times 10^{-4} \text{ с}$; $V_{рез} = 0,607 \text{ м/с}$.

Таблица 1– Расчетные значения отношения q / q_{max}

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
q / q_{max}	0,1	0,3658	0,522	0,6158	0,6729	0,7191	0,7558	0,7823	0,8042	0,8205

Как видно, чем больше величина n , тем больше отношение q / q_{max} . Очевидно, при точении величина n значительно меньше, чем при шлифовании. Следовательно, при точении уменьшается отношение q / q_{max} и температура резания q , что приводит в соответствие расчетные и экспериментальные значения температуры резания q . С учетом этого решения, полученные на основе зависимости (1), необходимо корректировать, умножая расчетное значение q на отношение q / q_{max} , приведенное в табл. 1, для заданной величины n .

При шлифовании величина n принимает достаточно большие значения и, исходя из табл. 1, отношение $q / q_{max} \approx 1$. Поэтому зависимость (1) не требует корректировки. Этим и объясняется тот факт, что расчеты температуры резания q при шлифовании по зависимости (1) приводят к удовлетворительным результатам, а при точении имеет место расхождение расчетных и экспериментальных значений температуры резания q .

Исходя из этого, возникает необходимость теоретического определения величины n при точении. Тангенциальную составляющую силы резания можно выразить зависимостью [7]:

$$P_z = s \times F, \quad (2)$$

где $F = z \times a_1 \times \epsilon$ – площадь контакта обрабатываемого материала с передней поверхностью резца, м^2 ; z – количество контактируемых элементарных объемов обрабатываемого материала с передней поверхностью резца (в данном случае для нулевого переднего угла резца); a_1 – длина контакта элементарного объема обрабатываемого материала с передней поверхностью резца, м; ϵ – ширина среза, м.

Сила, возникающая в условной плоскости сдвига обрабатываемого материала, равна

$$P = t_{\text{сдв}} \times L \times \epsilon, \quad (3)$$

где $t_{\text{сдв}}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м^2 ; L – длина условной плоскости сдвига обрабатываемого материала, м.

Из условия $P = P_z \times \cos b$ с учетом известных соотношений $s / s_{\text{сж}} = \tan b$ [4]; $s_{\text{сж}} / t_{\text{сдв}} \gg 2$ и зависимостей (2) и (3), имеем:

$$a_1 = \frac{a}{2 \times z \times \cos b}, \quad (4)$$

где $s_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м^2 .

Тогда $n = a / a_1 = 2 \times z \times \cos b$. Как правило, основная силовая напряженность процесса резания достигается в момент съема двух нижерасположенных элементарных объемов обрабатываемого материала [8]. Это связано, во-первых, с необходимостью достижения силы P в момент отделения элементарного объема от обрабатываемого материала. Во-вторых, в обеспечении с силой P его дальнейшего продвижения (за счет пластического течения) вдоль условной плоскости сдвига обрабатываемого материала до момента отделения нового элементарного объема от обрабатываемого материала. Несомненно, и в дальнейшем будет затрачена определенная энергия на преодоление его трения с передней поверхностью резца. Однако она будет значительно меньше энергий, затрачиваемых на отделение элементарного объема от обрабатываемого материала и обеспечение его пластического течения вдоль условной плоскости сдвига обрабатываемого материала. Поэтому в зависимости (1) этот фактор можно не рассматривать.

С учетом сказанного, в этом случае за основу можно принять значение $z = 2$. Тогда, исходя из зависимости $n = a / a_1 = 2 \times z \times \cos b$, величина $n \approx 4$ и отношение $q / q_{\text{max}} \gg 0,5$ (табл. 1). Поэтому в зависимости (1) следует учитывать уменьшение температуры резания q приблизительно в 2 раза, что приводит в соответствие расчетные и экспериментальные данные, полученные при точении стальных заготовок. Очевидно, при обработке хрупких материалов (чугунов) значения n и q / q_{max} (табл. 1) будут еще меньше, что позволит более значительно уменьшить температуру резания q .

Таким образом, в работе обоснованы отличительные особенности формирования температуры резания при точении по отношению к шлифованию. Полученные результаты позволяют уточнить расчеты температуры резания при точении. Из приведенного решения следует важный практический вывод, состоящий в том, что для снижения температуры резания q при точении следует уменьшать величины z и n , например, величину n до минимально возможного значения $n = 2$. Тогда, согласно табл. 1, отношение $q/q_{\max}$ и соответственно температура резания q могут быть уменьшены до 10 раз. Это достигается, главным образом, за счет увеличения условного угла сдвига обрабатываемого материала b путем снижения интенсивности трения в зоне резания [9] и повышения режущей способности инструмента.

Выводы

Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании и точении на основе представления снимаемого припуска в виде пакета элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые перерезаются режущим инструментом в процессе обработки. Показано, что при точении стальных заготовок для более точного расчета температуры резания необходимо учитывать количество перерезаний адиабатического стержня, т.е. количество элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания. Расчетами установлено, что в этом случае температура резания при точении уменьшается приблизительно в 2 раза, а это приводит в соответствие теорию и практику механической обработки. Также установлено, что чем меньше количество элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания, тем меньше температура резания, которая за счет этого может быть уменьшена до 10 раз.

Список використаних джерел

1. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков : ГП УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. – 448 с.
2. Лищенко Н. В. Модель температурного цикла шлифования для технологической диагностики процесса / Н. В. Лищенко, В. П. Ларшин // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2011. – Вип. 118. – С. 185-193.
3. Якимов А. А. Исследование температуры поверхности при зубошлифовании на станке 5851 (MAAG) / А. А. Якимов // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2010. – Вип. 101. – С. 281-285.
4. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография / Ф. В. Новиков. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 400 с.
5. Полянский В. И. Математическая модель теплового процесса при шлифовании материалов / В. И. Полянский // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – Вип. 1 (28). – С. 120-130.
6. Полянский В. И. Расчет температуры шлифования с учетом баланса тепла, уходящего в стружки и обрабатываемую деталь / В. И. Полянский // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – Вип. 13. – С. 51-59.
7. Новиков Ф. В. Упрощенный расчет температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 87-92.
8. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общей редакцией С. А. Клименко. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
9. Надтверді матеріали в механообробці : енциклопедичний довідник / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков ; за заг. ред. М. В. Новікова. – Київ : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.

References

1. Sizyj, JuA & Stalinskij, DV 2016, Dinamika i teplofizika shlifovanija, Gosudarstvennoe predprijetie ukraïnskij nauchno-tehnicheskij centr metallurgicheskoy promyshlennosti Jenergostal, Harkov.
2. Lishhenko, NV & Larshin, VP 2011, 'Model temperaturnogo cikla shlifovanija dlja tehnologicheskoy diagnostiki processa', Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka, iss. 118, pp. 185-193.
3. Jakimov, AA 2010, 'Issledovanie temperatury poverhnosti pri zuboshlifovanii na stanke 5851 (MAAG)', Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka, iss. 101, pp. 281-285.
4. Novikov, FV 2018, Osnovy matematicheskogo modelirovanija tehnologicheskikh processov mehanicheskoy obrabotki, LIRA, Dnepr.
5. Poljanskij, VI 2018, 'Matematicheskaja model teplovogo processa pri shlifovanii materialov', Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Kharkivskiy politekhnichnyi instytu, Kharkiv, iss. 1 (28), pp. 120-130.
6. Poljanskij, VI 2018, 'Raschet temperatury shlifovanija s uchetom balansa tepla, uhodjashhego v struzhki i obrabatyvaemuju detal', Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Kharkivskiy politekhnichnyi instytu, Kharkiv, iss. 13, pp. 51-59.
7. Novikov, FV & Poljanskij, VI 2017, Uproshhennyj raschet temperatury rezanija pri shlifovanii i lezviynoj obrabotke, Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Kharkivskiy politekhnichnyi instytu, Seriia Tekhnolohii v mashynobuduvanni, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Kharkivskiy politekhnichnyi instytu, Kharkiv, no. 17 (1239), pp. 87-92.
8. Klimenko, SA, Kolomic, VV, Hejfec, ML, Pylypenko, AM, Melnyichuk, YuA & Burykyn, VV 2011, Obrabotka rezaniem detalej s pokrytijami, Institut sverhtvjordyh materialov imeni V. N. Bakulja Nacionalnoj akademii nauk Ukrainy, Kiev.
9. Lavrinenko, VI & Novikov, MV 2013, Nadtverdi materialy v mekhanooobrobtci, Instytut nadtverdykh materialiv imeni V. M. Bakulia Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, Kyiv.

Стаття надійшла до редакції 12 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-33-39

УДК 621.923

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ КРУГА В УМОВАХ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ

©Стрельчук Р. М.¹, Шелковий О.М.²*Українська інженерно-педагогічна академія¹**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»²*

Інформація про авторів:

Стрельчук Роман Михайлович: ORCID: 0000-0002-7221-031X; r.m.strelchuk@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інформаційних комп'ютерних технологій і математики; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

Шелковий Олександр Миколайович: ORCID: 0000-0002-7414-4854; alnikshelk@gmail.com; доктор технічних наук; завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

У роботі наведено аналіз формул для підрахунку числа зерен алмазного круга, відстаней між ними, їх розподілів. Результати засновані на експериментальних дослідженнях і розрахункових методах з моделюванням конкретної форми зерен. Розбіжність кількісних даних пояснюється різним методичним підходом - профілографування, метод відбитків, оптичний, метод термопар, планіметричний, мікрошліфів і інші, а в розрахункових методах - відмінністю прийнятої форми зерна і вихідних розмірів зерен, заснованих на позначенні зернистості порошку. Крім того, з метою встановлення достовірних результатів, кожен із зазначених методів породжує цілий ряд особливих методик і оригінальних підходів. Профілографування робочої поверхні круга може здійснюватися алмазної голкою, долотоподібним щупом, із записом профілограм за двома допоміжним лініям, еквідистантно розташованим щодо контрольованої, з оцінкою рельєфу токопроводящей голкою для більш виразного розпізнавання алмазних зерен і виступів металевої зв'язки і т. д. І так в кожному методі. При цьому у відповідному відмітному способі наводиться аналіз переваг одного і недоліків іншого підходу.

Найбільш достовірним розрахунковим методом може вважатися той, при якому результати відповідають експериментальним даним, отриманим поштучним підрахунком числа зерен в одному караті і відповідного в одиниці об'єму алмазозного шару. У розрахунках така відповідність дозволяла судити про достовірність результатів.

Проводився аналіз і розрахунок зерен, котрі утримуються на робочій по-поверхні круга при найменшій глибині загортання в зв'язці. Багато дослідників як визначального параметра приймають максимальну висоту виступання зерен над рівнем зв'язки. У зв'язку з цим відзначимо, що мінімальна глибина закладення є більш надійною (стійкою), фізично яка визначається величиною, меншою мірою залежить від випадково факторів, що впливають.

Розглянута ймовірно-статистична модель робочої поверхні шліфувального круга дозволяє описати розподіл ординат точок сумарним ріжучим профілем з урахуванням характеристики алмазовмісного шару.

Ключові слова: електроерозійне алмазне шліфування, робоча поверхня круга, елементарний ріжучий профіль.

Стрельчук Р.М., Шелковой А.Н. «Математическое моделирование рабочей поверхности круга в условиях электроэрозионного алмазного шлифования»

В работе приведено анализ формул для подсчета числа зерен алмазного круга, расстояний между ними, их распределений. Результаты основаны на экспериментальных исследованиях и расчетных методах с моделированием конкретной формы зерен. Несовпадение количественных данных объясняется различным методическим подходом – профилографирование, метод отпечатков, оптический, метод термопар, планиметрический, микрошлифов и

другие, а в расчетных методах – различием принятой формы зерна и исходных размеров зерен, основанных на обозначении зернистости порошка. Кроме того, с целью установления достоверных результатов, каждый из отмеченных методов порождает целый ряд особенных методик и оригинальных подходов. Профилографирование рабочей поверхности круга может производиться алмазной иглой, долотообразным щупом, с записью профилограмм по двум вспомогательным линиям, эквидистантно расположенным относительно контролируемой, с оценкой рельефа токопроводящей иглой для более отчетливого распознавания алмазных зерен и выступов металлической связки и т. д. И так в каждом методе. При этом в соответствующем отличительном способе приводится анализ преимуществ одного и недостатков другого подхода.

Наиболее достоверным расчетным методом может считаться тот, при котором результаты соответствуют экспериментальным данным, полученным поштучным подсчетом числа зерен в одном карате и соответственно в единице объема алмазосодержащего слоя. В расчетах такое соответствие позволяло судить о достоверности результатов.

Производился анализ и расчет зерен, удерживающихся на рабочей поверхности круга при наименьшей глубине заделки в связке. Многие исследователи в качестве определяющего параметра принимают максимальную высоту выступания зерен над уровнем связки. В связи с этим отметим, что минимальная глубина заделки является более надежной (устойчивой), физически определяемой величиной, в меньшей мере зависящей от случайно воздействующих факторов.

Рассмотренная вероятностно-статистическая модель рабочей поверхности шлифовального круга позволяет описать распределение ординат точек суммарным режущим профилем с учетом характеристики алмазосодержащего слоя.

Ключевые слова: электроэрозионное алмазное шлифование, рабочая поверхность круга, элементарный режущий профиль.

Strelchuk R., Shelkovoy A. «Mathematical modeling of the working surface of the wheel in the conditions of electroerosive diamond grinding»

The paper presents an analysis of formulas for calculating the number of grains of the diamond wheel, the distances between them, and their distributions. The results are based on experimental studies and calculation methods with simulation of a specific shape of grains. The discrepancy in the quantitative data is explained by a different methodological approach - profiling, imprint method, optical, thermocouple method, planimetric, microsections, and others, and in calculation methods - by the difference in the accepted grain shape and initial grain sizes, based on the designation of the grain size of the powder. In addition, in order to establish reliable results, each of the noted methods gives rise to a number of special techniques and original approaches. Profiling of the working surface of the circle can be carried out with a diamond needle, a chisel-like probe, with the recording of profilograms along two auxiliary lines, equidistantly located relative to the controlled one, with an assessment of the relief of the conductive needle for more distinct recognition of diamond grains and protrusions of a metal bond, etc. each method. Moreover, the corresponding distinctive method provides an analysis of the advantages of one and the disadvantages of another approach.

The most reliable calculation method can be considered the one in which the results correspond to experimental data obtained by piecewise counting the number of grains in one carat and, respectively, per unit volume of the diamondiferous layer. In the calculations, this correspondence made it possible to judge the reliability of the results.

The analysis and calculation of grains held on the working surface of the circle at the smallest embedment depth in the bundle was carried out. Many researchers as the determining parameter accept the maximum height of the protrusion of grains above the ligament level. In this regard, we note that the minimum embedment depth is more reliable (stable), physically determined value, at least depending on randomly acting factors.

The considered probabilistic-statistical model of the working surface of the grinding wheel allows us to describe the distribution of the ordinates of the points with the total cutting profile, taking into account the characteristics of the diamond-containing layer.

Keywords: erosion diamond grinding, working surface of a circle, elementary cutting profile.

Вступ

Робоча поверхня алмазного шліфувального круга являє собою сукупність великої кількості хаотично розташованих алмазних зерен, зцементованих металевою зв'язкою. Геометричні параметри рельєфу є випадковими величинами. У цьому зв'язку для вивчення закономірностей електроерозійного алмазного шліфування доцільно використовувати методи теорії ймовірностей і математичної статистики.

Методологія дослідження

Будемо вважати, що робоча поверхня круга представлена рядом послідовно розташованих елементарних ріжучих профілів (ЕРП) [1], які мають вигляд плоских кривих, отриманих перетином алмазного круга пучком площин, що проходять через його вісь і перпендикулярних вектору швидкості різання (рис. 1). Закономірності розташування алмазних зерен на робочій поверхні круга, характеристики ЕРП, визначаються розмірами зерен, величиною їх виступання над рівнем зв'язки і параметром шорсткості поверхні зв'язки $Ra_{зв}$ [2].

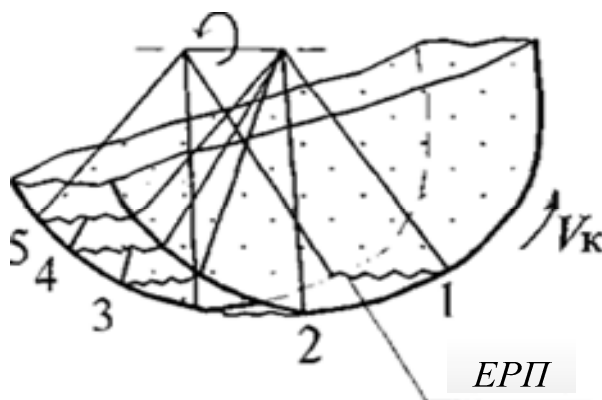


Рис. 1 До визначення робочої поверхні круга сукупністю елементарних ріжучих профілів (ЕРП)

Алмазні зерна мають у більшості випадків неправильну геометричну форму і різні розміри в межах однієї зернистості, у результаті чого важко характеризувати розмір зерна однієї геометричною величиною. Зернистість алмазного порошку визначається розмірами гнізд у світлі двох контрольних сит, через одне з яких зерна проходять, а на іншому затримуються. Однак, як правило, фактичний розмір зерна, обумовлений під мікроскопом, більше гнізда сита [3].

Це пояснюється тим, що частки подовженої форми можуть проходити через квадратні гнізда сита стоя, а плоскі – по діагоналі. Тому, крім основної фракції в складі даного порошку завжди зберігаються побічні фракції – крупніше і дрібніше основної. Наявність побічних фракцій приводить до значного відхилення фактичного середнього розміру зерен від розміру, котрий характеризує гніздами суміжних контрольних сит.

Якщо врахувати, що в реальному інструменті зерно може розташовуватися будь-якою своєю частиною стосовно зовнішньої робочої поверхні, то за еквівалентну форму зерна доцільно прийняти форму шара і діаметром d_{cp} , уважаючи всі його крапки ріжучими. Для визначення середнього еквівалентного діаметра d_{cp} скористаємося формулою, запропонованої в роботі [4] для підрахунку маси частки неправильної форми:

$$N = \frac{Q}{K_o r_a d_{cp}^2} 10^3, \quad (1)$$

де N – число абразивних часток у навісці, шт; Q - навіска абразивного порошку, г; K_o – коефіцієнт упакування (заповнення) обсягу частками неправильної форми; ρ_a - щільність абразиву, г/см³; d_{cp} – еквівалентний усереднений діаметр алмазного зерна, мм.

Беручи до уваги, що для алмазного порошку $\rho_a = 3,53$ г/см³; $Q = 0,2$ г; $K_o = 0,25$, одержимо:

$$d_{cp} = \frac{6,1}{\sqrt[3]{N}}, \quad (2)$$

де N – число алмазних зерен у навісці рівній 1 карату, тис. шт.

Отримана формула дозволяє визначити середній еквівалентний діаметр для алмазних зерен по числу їх у навісці в 1 караті.

У таблиці 1 наведені значення середнього еквівалентного діаметра зерна для алмазного порошку марки АС6.

Таблиця 1 – Значення середнього еквівалентного діаметра зерна для алмазного порошку марки АС6

Зернистість алмазного порошку, Z, мкм	Середнє число зерен в 1 караті порошка, N, тис. шт.	Середній еквівалентний діаметр зерна, d_{cp} , мм
400/315	2,44	0,453
315/250	4,53	0,368
250/200	8,41	0,300
200/160	15,6	0,244
160/125	29,1	0,198
125/100	54,0	0,161
100/80	100	0,131
80/63	186	0,106
63/50	346	0,086
50/40	644	0,070

Таким чином, еквівалент алмазного зерна у формі шару, що має середній діаметр d_{cp} , обчислений з умови збереження маси абразивної речовини і числа зерен, закладених в обсяг алмазного круга, дає можливість змодельовати ідеалізований шліфувальний інструмент, по своїй будові і основним властивостям, що найбільш відповідає реальному прототипу.

Математична модель

Висота зерен над рівнем зв'язки залежить від умов закріплення зерна зв'язуванням і навантаження, яке воно сприймає в процесі шліфування. Встановлено [5], що для найбільш типових режимів обробки максимальна висота виступання зерен перебуває в межах 0,18...0,25 їх розміру. У такий спосіб на робочій поверхні алмазного шліфувального круга випадковим образом розташовуються зерна, що виступають над поверхнею зв'язки на величину h_z , що змінюється в межах від 0 до 0,25 d_{cp} . Результати досліджень показують, що роз-

поділ значень h_3 у зазначених межах з достатньою надійністю можна описати законом нормального розподілу виду:

$$f(h_3) = \frac{1}{s_h^2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(h_3 - h_{cp})^2}{2s_h^2}}, \quad (3)$$

де h_{cp} - середня висота wystupання зерен над зв'язкою.

У розглянутому випадку поле розсіювання значень висоти зерен над рівнем зв'язки лежить у межах від 0 до $0,25 d_{cp}$. У зв'язку із цим маємо:

$$s_h = \frac{h_{3\max} - h_{3\min}}{6} = \frac{d_{cp}}{24}. \quad (4)$$

де s_h – середнє квадратичне відхилення.

Шорсткість поверхні зв'язки, що характеризується середнім арифметичним відхиленням профілю Ra_{3B} , залежить від великої кількості факторів і відповідно центральній граничній теоремі теорії ймовірностей і можна прийняти, що вона також підкоряється нормальному закону розподілу:

$$f(Ra_{3B}) = \frac{1}{s_{3B}^2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Ra_{3B} - Ra_{cp})^2}{2s_{3B}^2}}, \quad (5)$$

де s_{3B} – середнє квадратичне відхилення параметра шорсткості поверхні зв'язки алмазного круга.

Оскільки профіль поверхні зв'язки стаціонарен і описується нормальним законом розподілу між параметрами s_{3B} і Ra_{3B} має місце співвідношення:

$$Ra_{3B} = s_{3B} \sqrt{\frac{2}{\pi}}. \quad (6)$$

Отже, величина середнього квадратичного відхилення буде рівна:

$$s_{3B} = Ra_{3B} \sqrt{\frac{\pi}{2}}. \quad (7)$$

Таким чином, ордината довільної точки ЕРП алмазного круга визначається двома незалежними випадковими величинами h_3 і Ra_{3B} , кожна з яких підкоряється нормальному закону розподілу. Для визначення закону розподілу ординат ЕРП потрібно знайти щільність розподілу випадкової величини: $y = h_3 + Ra_{3B}$, тобто зробити композицію законів розподілу $f(h_3)$ і $f(Ra_{3B})$.

Застосовуючи загальну формулу для композиції законів розподілу [6] маємо:

$$g(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(Ra_{3B}) f(y - Ra_{3B}) dRa_{3B} = \frac{1}{2\pi s_h s_{3B}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{Ra_{3B}^2}{2s_{3B}^2} - \frac{(y - Ra_{3B} - h_{cp})^2}{2s_h^2}} dx. \quad (8)$$

Розкриваючи дужки в показнику підінтегральній функції і приводячи подібні члени одержимо:

$$g(y) = \frac{1}{2\pi s_h s_{3B}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-AX^2 + 2BX - C} dx. \quad (9)$$

$$\text{де } A = \frac{s_h^2 + s_{36}^2}{2s_h s_{36}}; B = \frac{y - h_{cp}}{2s_h^2}; C = \frac{(y - h_{cp})^2}{2s_h^2}.$$

З інтегрального вираховання відомо, що:

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-AX^2 + 2BX - C} dx = \sqrt{\frac{\pi}{A}} e^{\frac{AC - B^2}{A}}. \quad (10)$$

Підставляючи (10) в (9), після перетворень маємо:

$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{s_h^2 + s_{36}^2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y - h_{cp})^2}{2(s_h^2 + s_{36}^2)}}. \quad (11)$$

Таким чином, закон розподілу ординат ЕРП є законом нормального розподілу з математичним очікуванням m_e і середнім квадратичним відхиленням σ_e , які визначаються співвідношеннями:

$$\begin{aligned} m_e &= h_{cp}; \\ \sigma_e &= \sqrt{s_h^2 + s_{36}^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

У процесі обробки через деякий перетин оброблюваного виробу за один оберт алмазного круга проходить певна кількість ЕРП, кожний з яких знімає шар матеріалу. Результат послідовного впливу ЕРП може бути представлений як вплив, що обгинає, одержуваної при накладенні ЕРП один на одного [7]. Ця, що обгинає, називана сумарним ріжучим профілем (СРП) урахує разновисотність контактуючих зерен і ймовірність їх перекриття. Число послідовно розташованих ЕРП, що формують СРП із обліком їх незалежності визначається як:

$$n_e = \frac{\rho D_k}{l_s}, \quad (13)$$

де D_k – діаметр алмазного круга, мм; l_s – середня відстань між зернами, розташованими на робочій поверхні круга, мм.

Закон розподілу ординат СРП може бути знайдений зі співвідношення:

$$F(y) = \int_{-\infty}^y f(y_e) dy_e, \quad (13)$$

Будемо вважати, що розподіл ординат СРП підкоряється нормальному закону розподілу з математичним очікуванням m_e і середнім квадратичним відхиленням σ_e .

Параметри нормального розподілу при $n_e \geq 100$ з достатньою точністю можуть бути розраховані по формулах:

$$\begin{aligned} m_c &= 1,55 n_e^{0,11} s_e; \\ s_c &= \sqrt{0,49 n_e^{0,22} + s_e^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

де σ_e – середнє квадратическое відхилення ЕРП.

Висновки

Розглянута ймовірностно-статистична модель робочої поверхні шліфувального круга дозволяє описати розподіл ординат крапок СРП із урахуванням характеристики алмазозмістовного шару.

Список використаної літератури:

1. Дорофеев В. Д. Основы профильной алмазно-абразивной обработки / В.Д. Дорофеев. – Саратов : Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1983. – 186 с.
2. In process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation / R. Hasegawa, S. Matsusaka, H. Hidai [et al.] // *Precis Engineering*. – 2016. –N 48. – Pp. 164-171.
3. Основы алмазного шлифования / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, А. Ф. Раб [и др.]. – Киев : Техника, 1978. – 192 с.
4. Gutsalenko Yu. Exploitative destruction features for detonation ultra-dispersed diamonds of initial metallic protection for abrasive powder grains to diamond-spark grinding tools / Yu. Gutsalenko, C. Iancu, S. Bratan // *Fiability & Durability*. – 2015. – Supplement No. 1 (14). – Pp. 3-8.
5. Кобзарь Л. Е. Прогрессивное алмазно-искровое шлифование / Л. Е. Коб-зарь, В. А. Фадеев, Н. К. Беззубенко. – Харьков : ХГПУ – ХНПО «ФЭД», 1995. – 152 с.
6. Koshy P. Mechanism of Material Removal in Electrical Discharge Diamond Grinding / P. Koshy, V. K. Jain, G. K. Lal // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1996. – Vol. 36, Iss. 10. – Pp. 1173-1185
7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В 10 т. Т. 4. Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов / Под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 802 с.

References

1. Dorofeev, V.D. 1983, *Osnovy profilnoj almazno-abrazivnoj obrabotki*, Izdatelstvo Saratovskogo gosudarstvennogo universiteta, Saratov.
2. Hasegawa, R, Matsusaka, S, Hidai, H, Chiba, A, Morita, N & Onuma, T 2016, 'In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation', *Precis Engineering*, no. 48, pp. 164-171.
3. Semko, M.F, Grabchenko, A.I, Rab, A.F et al. 1978, *Osnovy almaznogo shlifovaniya*, Tehnika, Kiev.
4. Gutsalenko, Yu, Iancu, C & Bratan, S 2015, 'Exploitative destruction features for detonation ultra-dispersed diamonds of initial metallic protection for abrasive powder grains to diamond-spark grinding tools', *Fiability & Durability*, Supplement no. 1 (14), pp. 3-8.
5. Kobzar, L.E, Fadeev, V.A & Bezzubenko, N.K 1995, *Progressivnoe almazno-iskrovoe shlifovanie*, Harkovskij gosudarstvennyj politechnical universitet, HNPO FJeD, Harkov.
6. Koshy, P, Jain, V.K & Lal, G.K 1996, 'Mechanism of Material Removal in Electrical Discharge Diamond Grinding', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 36, iss. 10, pp. 1173-1185.
7. Novikov, F.V & Jakimov, A.V (eds.) 2002, *Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija*, vol. 4 *Teorija abrazivnoj i almazno-abrazivnoj obrabotki materialov*, Odesskij nacionalnyj politehnicheskij universitet, Odessa

Стаття надійшла до редакції 12 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-40-51
УДК 621.87

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ВІЛЬОТУ СТРІЛОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА ПРИ СУМІЩЕНІ РУХІВ РУКОЯТІ ТА ТЕЛЕСКОПІЧНОЇ СЕКЦІЇ

©Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Сподоба О.О.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Інформація про авторів:

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

Сподоба Олександр Олексійович: ORCID: 0000-0001-8217-866X; sp1309@ukr.net; аспірант кафедри конструювання машин і обладнання; Національний університет біоресурсів і природокористування України; навчальний корпус №11, вул. Героїв Оборони, 12, м. Київ, 03041, Україна.

В роботі розглянута методика побудови математичної моделі крана-маніпулятора в площині зміни вильоту стрілової системи із вантажем. Математична модель побудована із врахуванням трьох одночасних рухів, а саме, кутового переміщення рукояті, лінійного переміщення телескопічної секції та коливального руху захватного пристрою з вантажем. Розраховано функції зміни кінематичних та динамічних характеристик стрілової системи за одночасного переміщення її ланок та впливу коливального руху вантажу. Побудова математичної моделі виконується із застосуванням рівнянь Лагранжа другого роду. При цьому за узагальнені координати моделі крана-маніпулятора прийнято кутові координати положення рукояті та відхилення вантажу, а положення телескопічної секції визначається лінійною узагальненою координатою висунання штоку приводного гідроциліндру.

Механічні характеристики приводу представлені у вигляді квадратичних залежностей між діючими зусиллями та швидкостями переміщень штоків силових гідроциліндрів. Керування елементами приводу представлено у вигляді рівнянь витрати робочої рідини зі зміною площі прохідного перерізу у часі за лінійним законом.

В результаті отримано рівняння руху крана-маніпулятора з врахуванням впливу інерційної складової кожної ланки стрілової системи та впливу коливального руху вантажу на динамічні навантаження елементів металоконструкції та гідравлічного приводу. Розроблена математична модель дозволяє теоретично визначити вплив одночасного переміщення рукояті та телескопічної секції на коливання вантажу та вплив коливання вантажу на динамічні навантаження, які виникають в стріловій системі та елементах приводу крана-маніпулятора.

Ключові слова: математична модель, зміна вильоту, суміщення рухів, кран-маніпулятор, рівняння Лагранжа другого роду, динамічні навантаження, коливання вантажу.

Ловейкин В.С., Ромасевич Ю.А., Сподоба А.А. «Математическая модель динамики изменения вылета стреловой системы крана-манипулятора при совмещении движений рукояти и телескопической секции».

В работе рассмотрена методика построения математической модели крана-манипулятора в плоскости изменения вылета стреловой системы с грузом. Математическая модель построена с учетом трех одновременных движений, а именно, углового перемещения рукояти, линейного перемещения телескопической секции и колебательного движения захватного устройства с грузом. Рассчитано функции изменения кинематических и динамических характеристик стреловой системы при одновременном перемещении ее звеньев и влия-

ния колебательного движения груза. Построение математической модели выполняется с применением уравнений Лагранжа второго рода. При этом за обобщенные координаты модели крана-манипулятора принято, угловые координаты положения рукояти и отклонения груза, а положение телескопической секции определяется линейной обобщенной координатой выдвижения штока приводного гидроцилиндра.

Механические характеристики привода представленные в виде квадратичных зависимостей между действующими усилиями и скоростями перемещений штоков силовых гидроцилиндров. Управление элементами привода представлено в виде уравнений расхода рабочей жидкости с изменением площади проходного сечения во времени за линейным законом.

В результате получено уравнение движения крана-манипулятора с учетом влияния инерционной составляющей каждого звена стреловой системы и влияния колебательного движения груза на динамические нагрузки элементов металлоконструкции и гидравлического привода. Разработанная математическая модель позволяет теоретически определить влияние одновременного перемещения рукояти и телескопической секции на колебания груза и влияние колебания груза на динамические нагрузки, возникающие в стреловой системе и элементах привода крана-манипулятора.

Ключевые слова: математическая модель, изменение вылета, совмещение движений, кран-манипулятор, уравнения Лагранжа второго рода, динамические нагрузки, колебания груза.

Loveikin, V., Romasevich Yu., Spodoba O.O. «Mathematical model of the dynamics varying the radius jib system loader crane at adjustment movement arm and telescopic section»

In the paper considers the method of constructing a mathematical model in the plane of change of departure of the jib system of a link loader crane with a load. The mathematical model is built with three simultaneous movements, namely, the simultaneous angular movement of the arm, the linear movement of the telescopic section and the oscillatory movement of the gripping device with a load. The functions of changing the kinematic and dynamic characteristics of the jib system while simultaneously moving its links are calculated. The construction of a mathematical model is performed using the Lagrange equations of the second kind. In this case, for the generalized coordinates of the model of a loader crane, the angular coordinates of the position of the links of the jib system and the angular deviation of the load, and the position of the telescopic section is determined by the linear generalized coordinate of the extension of the rod of the drive hydraulic cylinder.

The mechanical characteristics of the drive, presented in the form of quadratic dependencies between the acting forces and the speeds of movement of the rods of the power hydraulic cylinders. The control of the drive elements is represented as equations of the working fluid flow rate with a change in the flow area of the according to a linear law.

As a result, the equation of motion of the loader crane was obtained, taking into account the influence of the inertial component of each link of the jib system and the influence of the oscillatory movement of the load on the dynamic loads of the metal construction and the hydraulic drive elements. The developed mathematical model makes it possible to theoretically determine the effect of the simultaneous movement of the jib and arm on the oscillations of the load, and the effect of the oscillation of the load on the dynamic loads arising in the jib system and elements of the loader crane drive.

Key words: mathematical model, varying the radius, combination of movements, loader crane, Lagrange equations of the second kind, dynamic loads, load oscillations.

Постановка проблеми.

В процесі виконання технологічного процесу розвантажувально-завантажувальних операцій в елементах стрілової системи та елементах приводу крана-маніпулятора виникають динамічні навантаження, в наслідок нерівномірного обертання стрілової системи при

рівномірному переміщенні штоків гідроциліндрів. Динамічні навантаження залежать від кінематичних параметрів з'єднання ланок стрілової системи крана-маніпулятора та від характеру зміни швидкості переміщення ланок стрілової системи з вантажем.

При суміщенні операцій одночасного переміщення двох ланок стрілової системи можна значно підвищити продуктивність, надійність елементів гідравлічного обладнання та стрілової системи крана-маніпулятора, а також знизити динамічні навантаження, які виникають в елементах стрілової системи та приводних механізмах. Для визначення дійсних динамічних навантажень в елементах конструкції крана-маніпулятора при суміщенні рухів ланок стрілової системи необхідно мати адекватні математичні моделі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботах [1-7] висвітлено основні методи побудови математичної моделі крана-маніпулятора. В даних роботах стрілова система крана-маніпулятора представлена як голономна механічна система, в якій центр ваги ланок елементів металоконструкції співпадає з їх геометричними параметрами.

В роботах [8-11] розглянуто побудову математичної моделі крана-маніпулятора, встановлено зв'язок між кінематичними залежностями привідної ланки крана-маніпулятора та вантажу. Проаналізовано вплив динамічних навантажень на елементи металоконструкції стрілової системи крана-маніпулятора.

В роботі [12] розглянуто вплив піддатливості робочої рідини та елементів гідравлічного приводу на динамічну навантаженість крана-маніпулятора з гідроприводом при суміщенні одночасного руху ланок стрілової системи.

В роботах [13-15] розглянуто аналіз впливу суміщення рухів трьох ланок стрілової системи на динамічну навантаженість крана-маніпулятора. При досить великому обсязі розгляду проблеми динамічного аналізу суміщення одночасного руху ланок стрілової системи, розв'язок даної задачі для кранів-маніпуляторів з гідроприводом не розглянуто з врахуванням коливання вантажу на кінці стрілової системи.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою даної роботи є побудова математичної моделі динаміки зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора при суміщенні операцій одночасного кутового переміщення рукояті та збільшення вильоту стрілової системи за рахунок висування телескопічної секції з коливаннями вантажу на кінці стрілової системи, а також дослідження динаміки зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора.

Виклад основного матеріалу.

При дослідженні динаміки зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора при суміщенні рухів (кутове переміщення рукояті, лінійне переміщення телескопічної секції та коливання вантажу) приймаємо наступні припущення: вважаємо, що усі ланки стрілової системи є абсолютно тверді тіла, окрім вантажу, який здійснює коливання на шарнірному підвісі в площині зміни вильоту; тертя в рухомих елементах і в'язке тертя рідини в трубопроводах не враховуємо; стисливість робочої рідини в елементах приводу не враховуємо.

Приймаючи наведені припущення, стрілову систему крана-маніпулятора в процесі зміни вильоту вантажу при суміщенні одночасно двох основних рухів ланок стрілової сис-

теми та коливального руху захватного пристрою з вантажем представляємо як голономну механічну систему з трьома ступенями вільності (рис.1). Кутові координати положення стрілової системи відраховуємо від осі x , а кутову координату відхилення вантажу від осі y . За узагальнені координати системи приймаємо: кутову координату повороту рукояті b ; кутове відхилення від вертикалі шарнірного підвісу захватного пристрою разом з вантажем n , та лінійну координату висування штоку приводного гідроциліндру U_3 .

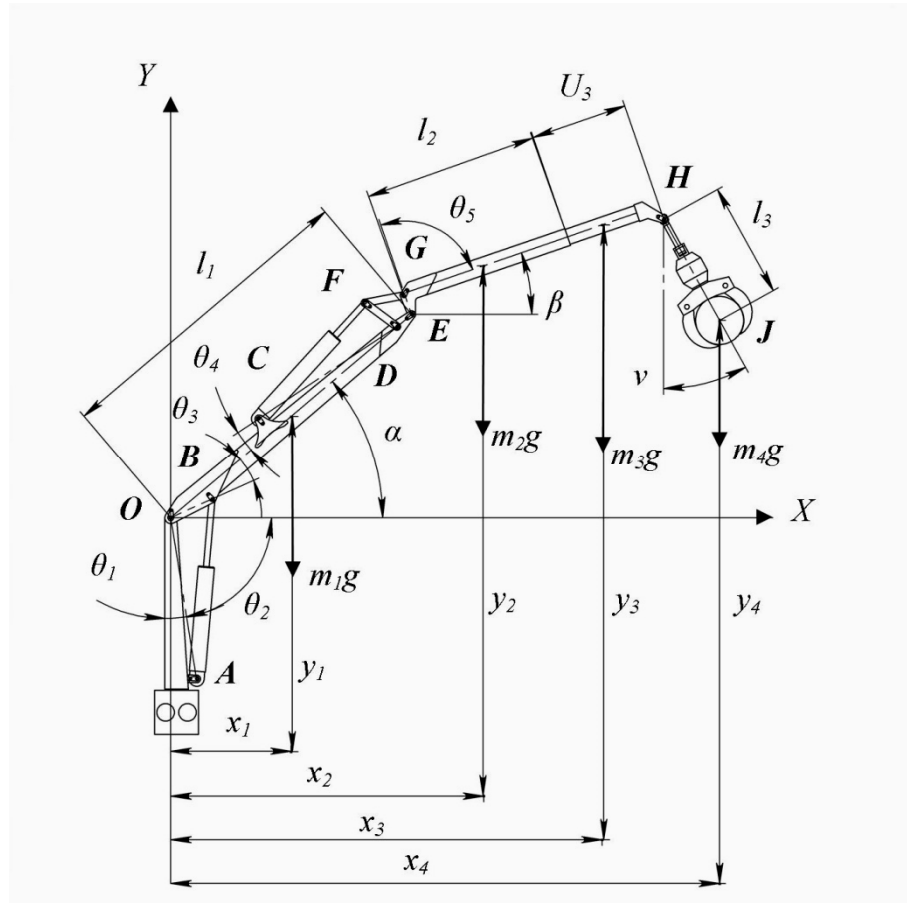


Рис. 1 – Динамічна модель стрілової системи крана-маніпулятора в процесі зміни вильоту при суміщенні рухів:

l_1 - довжина стріли; l_2 - довжина рукояті; l_3 - довжина шарнірного підвісу; m_1, m_2, m_3, m_4 - маси відповідно стріли, рукояті телескопічної секції та вантажу; q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 - кути утворені геометричними параметрами елементів стрілової системи та приводних механізмів крана-маніпулятора; x_1, x_2, x_3, x_4 - горизонтальні координати центрів мас стріли, рукояті та вантажу; y_1, y_2, y_3, y_4 - вертикальні координати центрів мас відповідно стріли, рукояті та вантажу.

Виразимо координати центрів мас для рукояті, телескопічної секції та захватного механізму з вантажем крана-маніпулятора через узагальнені координати:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 &= \frac{l_2}{2} \cos(b); \\ \ddot{y}_2 &= \frac{l_2}{2} \sin(b); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \ddot{x}_3 = \frac{\ddot{U}_3}{2} \cos(b); \\ \ddot{y}_3 = \frac{\ddot{U}_3}{2} \sin(b); \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_4 = (l_2 + U_3) \dot{\varphi} \cos(b) + l_4 \dot{\varphi} \sin(b); \\ \dot{y}_4 = (l_2 + U_3) \dot{\varphi} \sin(b) - l_4 \dot{\varphi} \cos(b). \end{cases} \quad (3)$$

Для складання рівнянь руху крана-маніпулятора в процесі зміни вильоту стрілової системи з вантажем за одночасного кутового переміщення рукояті, лінійного переміщення телескопічної секції та коливання вантажу використовуємо рівняння Лагранжа другого роду, які для системи, наведеної на (рис. 1), мають вигляд:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{b}} - \frac{\partial T}{\partial b} = Q_b - \frac{\partial \Pi}{\partial b}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{U}_3} - \frac{\partial T}{\partial U_3} = Q_{U_3} - \frac{\partial \Pi}{\partial U_3}; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = Q_{\varphi} - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi}, \end{cases} \quad (4)$$

де t - час; T, Π - відповідно кінетична та потенціальна енергія стрілової системи крана-маніпулятора в процесі зміни вильоту вантажу; $Q_b, Q_{U_3}, Q_{\varphi}$ - неконсервативні складові узагальнених сил системи, що відповідають узагальненим координатам b, U_3, φ .

Виразимо кінетичну енергію стрілової системи крана-маніпулятора:

$$T = \frac{1}{2} J_2 \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + m_4 (\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2), \quad (5)$$

де m_3 - маса телескопічної секції; m_4 - маса вантажу; J_2 - момент інерції рукояті відносно осі її обертання, точки E (рис. 1).

Запишемо вираз потенціальної енергії стрілової системи крана-маніпулятора в процесі зміни вильоту:

$$\Pi = (m_2 y_2 + m_3 y_3 + m_4 y_4) g, \quad (6)$$

де g - прискорення вільного падіння.

Візьмемо похідні від кінетичної енергії (5), що входять в систему рівнянь (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{b}} &= m_2 \dot{x}_2 \frac{\partial x_2}{\partial \dot{b}} + \dot{y}_2 \frac{\partial y_2}{\partial \dot{b}} + m_3 \dot{x}_3 \frac{\partial x_3}{\partial \dot{b}} + \dot{y}_3 \frac{\partial y_3}{\partial \dot{b}} + m_4 \dot{x}_4 \frac{\partial x_4}{\partial \dot{b}} + \dot{y}_4 \frac{\partial y_4}{\partial \dot{b}} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{U}_3} &= m_2 \dot{x}_2 \frac{\partial x_2}{\partial \dot{U}_3} + \dot{y}_2 \frac{\partial y_2}{\partial \dot{U}_3} + m_3 \dot{x}_3 \frac{\partial x_3}{\partial \dot{U}_3} + \dot{y}_3 \frac{\partial y_3}{\partial \dot{U}_3} + m_4 \dot{x}_4 \frac{\partial x_4}{\partial \dot{U}_3} + \dot{y}_4 \frac{\partial y_4}{\partial \dot{U}_3} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} &= m_2 \dot{x}_2 \frac{\partial x_2}{\partial \dot{\varphi}} + \dot{y}_2 \frac{\partial y_2}{\partial \dot{\varphi}} + m_3 \dot{x}_3 \frac{\partial x_3}{\partial \dot{\varphi}} + \dot{y}_3 \frac{\partial y_3}{\partial \dot{\varphi}} + m_4 \dot{x}_4 \frac{\partial x_4}{\partial \dot{\varphi}} + \dot{y}_4 \frac{\partial y_4}{\partial \dot{\varphi}} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{b}} &= J_2 \dot{\varphi} + m_2 \dot{x}_2 \frac{\partial x_2}{\partial \dot{b}} + \dot{y}_2 \frac{\partial y_2}{\partial \dot{b}} + m_3 \dot{x}_3 \frac{\partial x_3}{\partial \dot{b}} + \dot{y}_3 \frac{\partial y_3}{\partial \dot{b}} + m_4 \dot{x}_4 \frac{\partial x_4}{\partial \dot{b}} + \dot{y}_4 \frac{\partial y_4}{\partial \dot{b}} \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{U}_3} &= m_2 \dot{x}_2 \frac{\partial x_2}{\partial \dot{U}_3} + \dot{y}_2 \frac{\partial y_2}{\partial \dot{U}_3} + m_3 \dot{x}_3 \frac{\partial x_3}{\partial \dot{U}_3} + \dot{y}_3 \frac{\partial y_3}{\partial \dot{U}_3} + m_4 \dot{x}_4 \frac{\partial x_4}{\partial \dot{U}_3} + \dot{y}_4 \frac{\partial y_4}{\partial \dot{U}_3} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\mathbb{I}II}{\mathbb{I}b} &= \frac{\mathbb{a}}{\mathbb{c}} m_2 \frac{\mathbb{I}y_2}{\mathbb{I}b} + m_3 \frac{\mathbb{I}y_3}{\mathbb{I}b} + m_4 \frac{\mathbb{I}y_4}{\mathbb{I}b} \frac{\ddot{\mathbb{O}}}{\emptyset} \times g; \\ \frac{\mathbb{I}II}{\mathbb{I}U_3} &= \frac{\mathbb{a}}{\mathbb{c}} m_3 \frac{\mathbb{I}y_3}{\mathbb{I}U_3} + m_4 \frac{\mathbb{I}y_4}{\mathbb{I}U_3} \frac{\ddot{\mathbb{O}}}{\emptyset} \times g; \\ \frac{\mathbb{I}II}{\mathbb{I}n} &= m_4 \frac{\mathbb{I}y_4}{\mathbb{I}n} \times g. \end{aligned} \quad (8)$$
$$\begin{aligned} Q_b db &= F_2 \succ dU_2, \\ Q_{U_2} dU_3 &= F_3 \succ dU_3. \end{aligned} \quad (9)$$
$$\begin{aligned} Q_b &= F_2 \frac{\mathfrak{U}U_2}{\mathfrak{U}b}; \\ Q_{U_2} &= F_3, \end{aligned} \quad (10)$$

Підставивши вирази (7 – 10) в систему рівнянь (4), отримаємо систему диференціальних рівнянь руху крана-маніпулятора в процесі зміни вильоту стрілової системи з вантажем при суміщенні двох рухів:

$$\begin{aligned}
 & J_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 \times \frac{a_2}{e} \times \frac{1}{b} \times \ddot{x}_2 + \ddot{y}_2 \times \frac{1}{b} + m_3 \times \frac{a_3}{e} \times \frac{1}{b} \times \ddot{x}_3 + \ddot{y}_3 \times \frac{1}{b} + m_4 \times \frac{a_4}{e} \times \frac{1}{b} \times \ddot{x}_4 + \ddot{y}_4 \times \frac{1}{b} = \\
 & = -F_2 \times \frac{1}{b} - m_2 \times \frac{1}{b} \times \ddot{y}_2 + m_3 \times \frac{1}{b} \times \ddot{y}_3 + m_4 \times \frac{1}{b} \times \ddot{y}_4 \times g; \\
 & m_3 \times \frac{a_3}{e} \times \frac{1}{U_3} \times \ddot{x}_3 + \ddot{y}_3 \times \frac{1}{U_3} + m_4 \times \frac{a_4}{e} \times \frac{1}{U_3} \times \ddot{x}_4 + \ddot{y}_4 \times \frac{1}{U_3} = F_3 - m_3 \times \frac{1}{U_3} \times \ddot{y}_3 + m_4 \times \frac{1}{U_3} \times \ddot{y}_4 \times g; \\
 & m_4 \times \frac{a_4}{e} \times \frac{1}{n} \times \ddot{x}_4 + \ddot{y}_4 \times \frac{1}{n} = -m_4 \times \frac{1}{n} \times g.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Знайдемо координати приводних механізмів (рис. 2), що входять в систему рівнянь (11).

$$CF = U_2 = \sqrt{CD^2 + DF^2 - 2 \times CD \times DF \times \cos(\angle CDF)}. \tag{12}$$

Для визначення $\angle CDF$ спочатку розглянемо чотирьох ланковий механізм $EDFG$ (рис. 2), і визначимо діагональ DG :

$$DG = \sqrt{EG^2 + DE^2 - 2 \times EG \times DE \times \cos(\angle DEG)}. \tag{13}$$

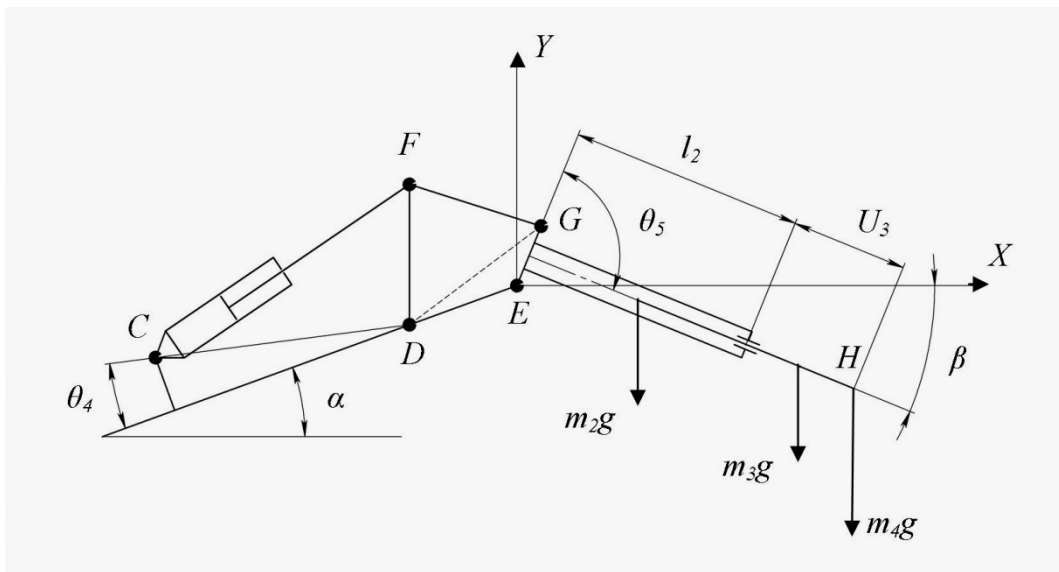


Рис. 2 – Кінематична схема привода рукояті

$$\angle DEG = \rho - (q_5 + b - a). \tag{14}$$

Після підстановки виразу (15) в залежність (14) отримаємо:

$$DG = \sqrt{EG^2 + DE^2 - 2 \times EG \times DE \times \cos(q_5 + b - a)}. \tag{15}$$

Використовуючи теорему синусів, запишемо:

$$\frac{\sin \angle DEG}{DG} = \frac{\sin \angle EDG}{EG}. \tag{16}$$

З рівняння (17) знаходимо:

$$\angle ADE = \text{ArcSin} \frac{EG \times \sin(q_5 + b - a)}{DG}. \tag{17}$$

Кут $\angle FDG$ знайдемо з виразу:

$$FG^2 = DF^2 + DG^2 - 2 \times DF \times DG \times \cos \angle FDG. \quad (18)$$

Тоді:

$$\angle FDG = \arccos \frac{DG^2 + DF^2 - FG^2}{2 \times DF \times DG} \quad (19)$$

Склавши вирази (18) і (20) знайдемо кут $\angle EDF$:

$$\angle EDF = \arcsin \frac{EG \times \sin(q_5 + b - a)}{DG} + \arccos \frac{DG^2 + DF^2 - FG^2}{2 \times DF \times DG} \quad (20)$$

Тепер можна знайти кут $\angle CDF$:

$$\angle CDF = p - \angle EDF - q_4. \quad (21)$$

Після підстановки виразу (22) в залежність (13) отримуємо:

$$U_2 = \sqrt{CD^2 + DF^2 + 2 \times CD \times DF \times \cos(\angle EDF - q_4)}. \quad (22)$$

Рушійні зусилля в силових гідроциліндрах визначаються з механічних характеристик, які представлені у вигляді квадратичних залежностей між діючими зусиллями та швидкостями переміщень штоків силових гідроциліндрів:

$$\begin{aligned} F_2 &= P_n \times A_2 \times \sqrt{1 - \frac{A_2 \times U_2}{Q_2}}, \\ F_3 &= P_n \times A_3 \times \sqrt{1 - \frac{A_3 \times U_3}{Q_3}}, \end{aligned} \quad (23)$$

де: P_n - тиск рідини в гідравлічній системі створений насосом; A_2 - площа поршня гідроциліндра приводу рукояті; A_3 - площа поршня гідроциліндра приводу телескопічної секції; U_2 швидкість переміщення штоку гідроциліндра приводу рукояті; U_3 швидкість переміщення штоку гідроциліндра приводу телескопічної секції.

Витрата робочої рідини, яка протікає через гідророзподільник для надання приводним гідроциліндрам потрібного режиму пуску та подальшого переміщення стрілової системи, визначається наступними залежностями, відповідно для гідроциліндрів приводу рукояті та телескопічної секції:

$$\begin{aligned} Q_2 &= m \times f_2 \times \sqrt{\frac{2 \times g \times DP_2}{r}}, \\ Q_3 &= m \times f_3 \times \sqrt{\frac{2 \times g \times DP_3}{r}}, \end{aligned} \quad (24)$$

де: DP_2 - перепад тиску в гідроциліндрі приводу рукояті; DP_3 - перепад тиску в гідроциліндрі приводу телескопічної секції; m - коефіцієнт витрати робочої рідини, який залежить від конструкції дроселя та визначається експериментально (для кромкових гідророзподільників $m = 0.65 - 0.7$); f_2, f_3 - площі прохідних перерізів гідравлічного розподільника; r - питома маса рідини.

Для розрахунку динаміки зміни вильоту стрілової системи крана-маніпулятора використовуємо такі вихідні параметри: $m_2 = 155 \text{ кг}$, $m_3 = 65 \text{ кг}$, $m_4 = 650 \text{ кг}$, $l_1 = 4 \text{ м}$, $l_2 = 2,1 \text{ м}$, $l_3 = 0,8 \text{ м}$, $AO = 1,6 \text{ м}$, $OB = 0,5 \text{ м}$, $CD = 1,6 \text{ м}$, $l_1 = 4 \text{ м}$, $DF = 0,425 \text{ м}$, $FG = 0,425 \text{ м}$,

$EG = 0,425м$, $DE = 0,255м$, $P_n = 20 \times 10^6 Па$, $A_2 = 0,00915м^2$, $A_3 = 0,003115м^2$,
 $q_1 = 0,192рад$, $q_2 = 1,378рад$, $q_3 = 0,384рад$, $q_4 = 0,157рад$, $q_5 = 1,57рад$, $r = 850кг/м^3$
 $a = 0,1рад$.

Початкові умови руху маніпулятора: $b[0] = 0.2$, $\theta[0] = 0$, $U_3[0] = 0$, $\theta_3[0] = 0$, $n[0] = 0$,
 $\dot{\theta}[0] = 0$.

Підставивши в систему рівнянь (11) вихідні параметри та початкові умови і розв'язавши її, визначено кінематичні і силові характеристики стрілової системи крана-маніпулятора та побудовано графічні залежності (рис. 3). При розв'язку системи рівнянь було прийнято такі припущення: час відкривання золотникового гідророзподільника становить 0,1 с; площа прохідного перерізу гідророзподільника змінювалась за лінійним законом.

Аналізуючи наведені графічні залежності переміщення елементів приводу та ланок стрілової системи (рис. 3, а – рис. 3, в), можна визначити у відповідності до геометричних та кінематичних характеристик функціональну залежність кутового переміщення ланок стрілової системи при лінійному переміщенні штоків силових гідроциліндрів.

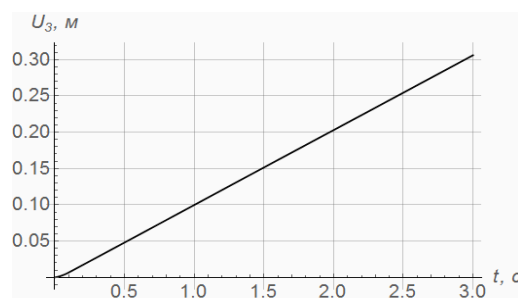
Розв'язавши систему рівнянь з вихідними параметрами та початковими умовами, побудовано графічні залежності розгону та виходу на усталений рух штоків приводних гідроциліндрів та відповідно ланок стрілової системи (рис. 3, г – рис. 3, е) за умови одночасного переміщення рукояті, телескопічної секції та вантажу. Аналізуючи графічні залежності швидкостей штоків силових гідроциліндрів, можна зазначити, що розгін штоку гідроциліндра переміщення рукояті відбувається протягом 0,5 с, а на усталеному русі супроводжується динамічними навантаженнями коливального характеру. При цьому максимальне значення швидкості усталеного руху становить 0,075 м/с. Для штоку гідроциліндра привода телескопічної секції вихід на усталений рух відбувається протягом 0,15 с, при цьому швидкість переміщення становить 0,105 м/с. Вихід на усталений рух рукояті (рис. 3, д) відбуваються у відповідності до виходу на усталений рух штоку приводного гідроциліндра, в подальшому супроводжується динамічними навантаженнями. Кутова швидкість переміщення рукояті на початку усталеного руху становить 0,23 рад/с, при подальшому переміщенні незначно зростає. Поступове зростання швидкості рукояті при усталеному русі штоку гідроциліндра викликане кінематичними параметрами стрілової системи крана-маніпулятора та відповідно коливальним рухом вантажу (рис. 3, з).

Із системи рівнянь (11) та виразів (23-24) визначено функціональну залежність зміни тиску в робочих камерах гідроциліндрів в процесі одночасного переміщення рукояті, телескопічної секції та вантажу (рис. 3 є – рис. 3 ж). Як видно з графічних залежностей тиск на початку руху дорівнює $2 \times 10^7 Па$, що відповідає тиску робочої рідини в гідросистемі. При подальшому переміщенні ланок стрілової системи і виходу її на усталений рух тиск в гідроциліндрі приводу рукояті становить приблизно $7 \times 10^6 Па$, та супроводжується незначними коливаннями. Це спричинено інерційною складовою ланок стрілової системи та відповідно виникнення в ній та елементах приводу динамічних навантажень спричинених коливальним рухом вантажу (рис. 3, з).

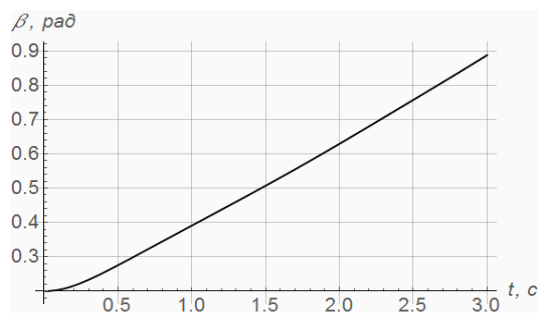
Враховуючи інерційні складові ланок стрілової системи та коливання тиску робочої рідини в привідних гідроциліндрах, побудовано залежність коливання вантажу на кінці стрілової системи при одночасному переміщенні рукояті та телескопічної секції (рис. 3, з).



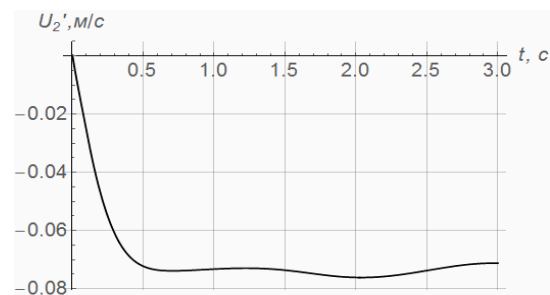
а)



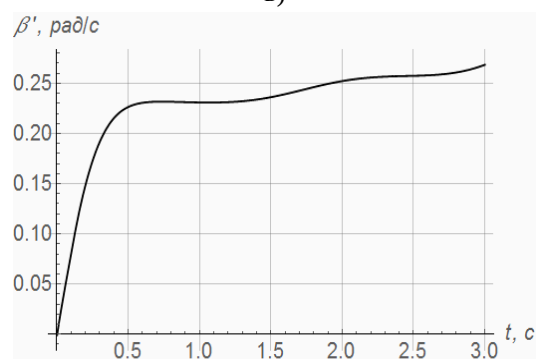
б)



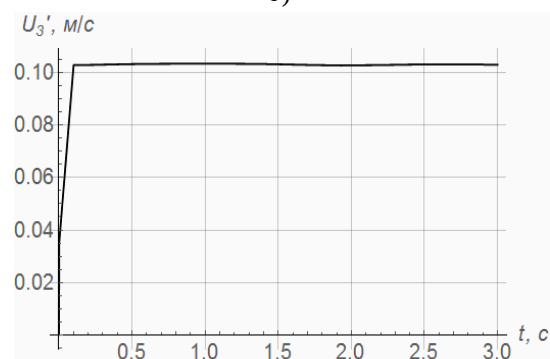
в)



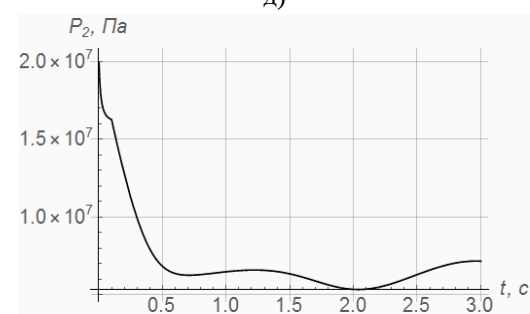
г)



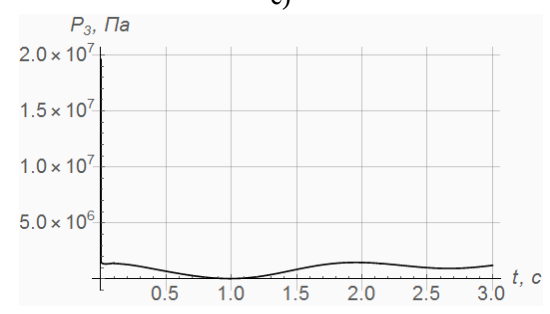
д)



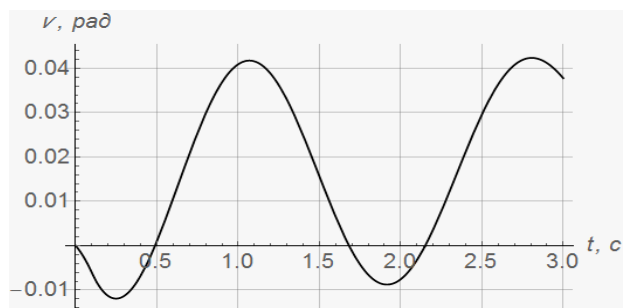
е)



е)



ж)



з)

Рис. 3 – Графіки функцій що описують переміщення стрілової системи: а) – переміщення штоку гідроциліндра приводу рукояті; б) – переміщення штоку приводу телескопічної секції; в) – кутове переміщення рукояті; г) – швидкість переміщення штоку гідроциліндра приводу рукояті; д) – швидкість кутового переміщення рукояті; е) – швидкість переміщення штоку гідроциліндра приводу телескопічної секції; є) – зміна тиску в гідроциліндрі приводу рукояті; ж) зміна тиску в гідроциліндрі приводу телескопічної секції; з) – коливання вантажу.

Із наведеної графічної залежності можна побачити характерну відповідність відхилення захватного механізму з вантажем від вертикалі (рис. 3, з) яка збігаються по часу із динамічними навантаженнями в елементах приводу, ланках стрілової системи (рис. 3, д – рис. 3, є) та коливанням тиску робочої рідини (рис. 3, є – рис. 3, ж). Виходячи з початкових умов на початку руху відхилення вантажу відсутнє. При виході на усталений рух телескопічної секції (рис. 3, е) відхилення вантажу становить - $0,01\text{rad}$, а коливання рукояті (рис. 3, д) є незначними. Протягом переміщення стрілової системи максимальне відхилення вантажу становить $0,041\text{rad}$, що ускладнює позиціонування вантажу при розвантажувально-навантажувальних операціях та призводить до збільшення динамічних навантажень в елементах металоконструкції та приводу.

Висновки.

В результаті проведеного дослідження побудовано математичну модель динаміки зміни вильоту в площині переміщення стрілової системи з вантажем крана-маніпулятора за умови суміщення одночасного кутового переміщення рукояті, лінійного переміщення телескопічної секції та захватного пристрою з вантажем. Проведено динамічний аналіз механізму переміщення рукояті та одночасного переміщення телескопічної секції з врахуванням впливу коливального руху захватного пристрою з вантажем. Отримано графічні залежності кінематичних характеристик та динамічних навантажень в стріловій системі та елементах приводу крана-маніпулятора. Запропонована математична модель дає змогу визначити дійсні динамічні навантаження в елементах конструкції маніпулятора та приводних механізмах за умови одночасного переміщення двох ланок стрілової системи та вантажу на кінці стріли. Отримані результати можна використати у проектуванні нових стрілових систем кранів-маніпуляторів, а також їхнього раціонального використання в умовах експлуатації.

Список использованных источников:

1. Ковальский В. Ф. Математическое моделирование динамики манипуляционной системы мобильной транспортно-технологической машины с учетом упругости звеньев / В. Ф. Ковальский // Известия МГТУ МАМИ. – 2016. – № 3. – С. 9-15.
2. Мильто А. А. Динамический и прочностной анализ гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных транспортно-технологических машин: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины» / Мильто А. А. – М., 2016. – 172 с.
3. Бакай Б. Я. Попереднє представлення рівняння динаміки маніпулятора методом Лагранжа-Ейлера / Б. Я. Бакай // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.18. – С. 322-327.
4. Заболотный К. С. Использование прямой задачи динамики для расчета манипулятора тоннельного укладчика / К. С. Заболотный, А. А. Сирченко, А. Л. Жупиев // Вібрації в техніці та технологіях. Національний гірничий університет. – 2016. – № 2 (82). – С. 22-27.
5. Тертычный-Даури В. Ю. Динамика робототехнических систем / В. Ю. Тертычный-Даури. – СПб : НИУ ИТМО, 2012. – 128 с.
6. Dobrachev A. A. Simulating the dynamic reaction of manipulator supports / A. A. Dobrachev, L. T. Raevskaya, A. V. Shvets // Russian Engineering Research. – 2010 – № 1. – Pp. 11-16.
7. Добрачев А. А. Кинематические схемы, структуры и расчет параметров лесопромышленных манипуляторных машин : монография / А. А. Добрачев, Л. Т. Раевская, А. В. Швец. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2014. – 128 с.
8. Ловейкін В. С. Математична модель динаміки зміни вильоту крана маніпулятора з жорсткими ланками / В. С. Ловейкін, Д. О. Міщук // Техніка будівництва. – 2006. – № 19. – С. 26-29.
9. Ловейкін В. С. Математичне моделювання зміни вильоту вантажу маніпулятором з гідроприводом / В. С. Ловейкін, Д. О. Міщук // Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини : зб. наук. пр. – Київ, 2012. – № 79. – С. 9-15.
10. Лагереv И. А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов : монография / И. А. Лагереv. – Брянск : РИО БГУ, 2016. – 371 с.

11. Ловейкін В. С. Експериментальне дослідження динаміки руху штока гідроциліндра підйому шарнірнозчленованої стрілової системи крана-маніпулятора з гідроприводом / В. С. Ловейкін, Д. О. Мішук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини : зб. наук. пр. – Київ, 2011. – № 78. – С. 28-34.
12. Емтыль З. К. О влиянии податливости рабочей жидкости и элементов гидропривода на динамическую нагруженность гидроманипулятора при совмещении движений звеньев / З. К. Емтыль, И. М. Бартеков, А. П. Татаренко // Труды Физического Общества Республики Адыгея. – Майкоп : Изд-во АГУ, 2000. – № 6. – С. 83-87.
13. Гидроманипуляторы и лесотехническое оборудование : монография / З. К. Емтыль, И. М. Бартеков, М. В. Драплик [и др.]. – М. : Наука, 2011. – 408 с.
14. Мішук Д. О. Дослідження динамічної моделі гідравлічного циліндра об'ємного гідроприводу / Д. О. Мішук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини : зб. наук. пр. – Київ, 2016. – № 87. – С. 74-81.
15. Ловейкин В. С. Синтез оптимального динамического режима движения стрелы манипулятора, установленного на упругом основании / В. С. Ловейкин, Д. А. Мишук // Наука и техника. – 2019. – Том 18, № 1. – С. 55-61.

References

1. Kovalskij, VF 2016, 'Matematicheskoe modelirovanie dinamiki manipulacionnoj sistemy mobilnoj transportno-tehnologicheskoy mashiny s uchetom uprugosti zvenev', Izvestija Moskovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta MAMI, no. 3, pp. 9-15.
2. Milto, AA 2016, 'Dinamicheskij i prochnostnoj analiz gidravlicheskih krano-manipulyatornyh ustanovok mobilnyh transportno-tehnologicheskij mashin', Kand.tech.n. thesis, Moskovskiy avtomobilno-dorozhnyiy gosudarstvennyiy tehnikeskij universitet, Moskva.
3. Bakaj, BYa 2011, 'Poperednie predstavleniya rivniannya dynamiki manipulyatora metodom Lahranzha-Eilera', Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, no. 21.18, pp. 322-327.
4. Zabolotnyj, KS, Sirchenko, AA & Zhupiev, AL 2016, 'Ispolzovanie prjamoj zadachi dinamiki dlja rascheta manipulyatora tonnelnogo ukladchika', Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. Natsionalnyi hirnychiy universytet, no. 2(82), pp. 22-27.
5. Tertychnyj-Dauri, VJu 2012, Dinamika robototekhnicheskijh sistem, Nacionalnyj issledovatel'skij universitet informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki, Sankt-Peterburg.
6. Dobrachev, AA, Raevskaya, LT & Shvets, AV 2010, 'Simulating the dynamic reaction of manipulator supports', Russian Engineering Research, no. 1, pp. 11-16.
7. Dobrachev, AA, Raevskaya, LT & Shvec, AV 2014, Kinematicheskie shemy, struktury i raschet parametrov lesopromyshlennyh manipulyatornyh mashin, Uralskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet, Ekaterinburg.
8. Loveikin, VS & Mishchuk, DO 2006, 'Matematychna model dynamiky zminy vylyotu krana manipulyatora z zhorstkymy lankamy', Tekhnika budivnytstva, no.19, pp. 26-29.
9. Loveikin, VS & Mishchuk, DO 2012, 'Matematychno modeliuвання зміни вильоту вантажу манипулятором з гідроприводом', Hirnychi, budivelni, dorozhni i melioratyvni mashyny, Kyiv, no. 79, pp. 9-15.
10. Lagerev, IA 2016, Modelirovanie rabochih processov manipulacionnyh sistem mobilnyh mnogocelevyh transportno-tehnologicheskijh mashin i kompleksov, Redakcionno-izdatelskij otdel Brjanskogo gosudarstvennogo universiteta, Brjansk.
11. Loveikin, VS & Mishchuk, DO 2011, 'Eksperymentalne doslidzhennia dynamiky rukhu shtoka hidrosylindra pidymu sharnirozchlenovanoi strilovoi systemy krana-manipulyatora z hidropryvodom', Hirnychi, budivelni, dorozhni i melioratyvni mashyny, no. 78, pp. 28-34.
12. Emtyl, ZK, Bartenev, IM & Tatarenko, AP 2000, 'O vlijanii podatlivosti rabochej zhidkosti i jelementov gidroprivoda na dinamicheskiju nagruzhennost gidromanipulyatora pri sovmeshhenii dvizhenij zvenev', Trudy Fizicheskogo Obshhestva Respubliki Adygeja, Izdatelstvo Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta, Majkop, no. 6, pp. 83-87.
13. Emtyl, ZK, Bartenev, IM, Draplyuk, MV, Popikov, P, Buhtoyarov, A & Tatarenko, L 2011, Gidromanipulyatory i lesotekhnicheskoe oborudovanie, Nauka, Moskva.
14. Mishchuk, DO 2016, 'Doslidzhennia dynamichnoi modeli hidravlichnoho tsylindra obiemnoho hidropryvod', Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny, Kyiv, no. 87, pp. 74-81.
15. Lovejkin, VS & Mishchuk, DO 2019, 'Sintez optimalnogo dinamicheskogo rezhima dvizhenija strely manipulyatora, ustanovlennogo na uprugom osnovanii', Nauka i tehnika, vol. 18, no. 1, pp. 55-61.

Стаття надійшла до редакції 15 жовтня 2019 р.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КАНАТУ

©Фідровська Н.М.¹, Писарцов О.С.², Ломакін А.О.³*Харківський національний автомобільно-дорожній університет¹**Науково-виробниче підприємство ХАРТРОН-АРКОС²**Українська інженерно-педагогічна академія³***Інформація про авторів:**

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

Писарцов Олександр Сергійович: ORCID: 0000-0003-4661-5441, alex.pisartsov@gmail.com; кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-виробниче підприємство ХАРТРОН-АРКОС, вул. Академіка Проскури 1, м. Харків, 61070, Україна

Ломакін Андрій Олександрович: ORCID 0000-0001-6729-3168; delgadokh@gmail.com; кандидат технічних наук, старший викладач кафедри практичної психології; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

Сучасний рівень розвитку техніки потребує все нові вимоги до надійності і довговічності підйомних канатів. При виборі конструкції канатів потрібно виходити із тих умов, в яких вони будуть експлуатуватися і проводити розрахунки саме виходячи з цих умов. Метод розрахунку канатів, який застосовується стандартом на теперішній час, не відображає дійсних умов роботи канату і не забезпечує його потрібної довговічності. В тих розрахунках, які наводяться в навчальній і довідковій літературі, недооцінюється вплив геометричних і пружних параметрів канатних блоків на довговічність канату. Канат вибирається тільки з умов на розтягнення, в той час, як експериментально доведено, що розрив дртинок в більшості випадків виникає саме при проходженні канатом блоку.

Розглядаючи сили, які виникають при набіганні канату на шків, визначена залежність сили натягу дроту канату на перехідній ділянці в залежності від радіусу пасма, радіусу шківів і кута звивки дртинок. При набіганні канату на шків подовження проволок на випуклій стороні канату в залежності від сил тертя буде розподілятися в сторону стиску на вогнутій стороні канату. Це подовження змінює осьове зусилля в проволочі.

Для забезпечення відсутності зношування канату і блоку, в точці сходу канату з блоку, була отримана математична залежність для максимально допустимого кута відхилення канату, який сходе з блоку. З умови прилягання канату до борту блоку і запобігання перелому канату по краю борту ривчака був визначений максимально допустимий кут повороту канату в місці відриву його від поверхні блоку.

Кут розкриття ривчака блоку визначається із умови зменшення кручення канату при його девіації і його величина має дуже значний вплив на довговічність канату. В роботі було проаналізовано вплив кута розкриття ривчака блоку на допустимий кут відхилення канату, який збігає з блоку.

Внаслідок жорсткості канату і того, що його кривизна в зоні набігання на блок змінюється не миттєво, а з деякою кінцевою швидкістю, при набіганні канату на блок, прилягання канату не проходить по всій довжині ручія. Приймавши закон змінення навантаження зігнутого канату з урахуванням сили тертя між блоком і канатом було отримано формулу для визначення кута, на якому канат відходить від блоку. Це дозволяє отримати більш реальну картину навантаження канату, який зігнутий на блоці.

Ключові слова: кран; механізм підйому; канат; канатний блок; контактні напруження; кут відхилення канату; довговічність каната.

Фидровская Н.Н., Писарцов А.С., Ломакин А.А. «Усовершенствование методики определения долговечности канатов»

Современный уровень развития техники требует все новые требования к надежности и долговечности подъемных канатов. При выборе конструкции канатов нужно исходить из тех условий, в которых они будут эксплуатироваться, и проводить расчеты именно исходя из этих условий. Метод расчета канатов, который применяется стандартом в настоящее время, не отражает действительных условий работы каната и не обеспечивает его необходимую долговечность. В тех расчетах, которые приводятся в учебной и справочной литературе, недооценивается влияние геометрических и упругих параметров канатных блоков на долговечность каната. Канат выбирается только из условий на растяжение, в то время, как экспериментально доказано, что разрыв проволок в большинстве случаев возникает именно при прохождении канатом блока.

Рассматривая силы, возникающие при набегании каната на шкив, определена зависимость силы натяжения проволоки каната на переходном участке в зависимости от радиуса пряди, радиуса шкива и угла свивки проволок. При набегании каната на шкив удлинение проволоки на выпуклой стороне каната в зависимости от сил трения будет распределяться в сторону сжатия на вогнутой стороне каната. Это удлинение меняет осевое усилие в проволоке.

Для обеспечения отсутствия износа каната и блока, в точке схода каната с блока, была получена математическая зависимость для максимально допустимого угла отклонения каната, который сходит с блока. Из условия прилегания каната к борту блока и предотвращения перелома каната по краю борта ручья был определен максимально допустимый угол поворота каната в месте отрыва его от поверхности блока.

Угол раскрытия ручья блока определяется из условия уменьшения кручения каната при его девиации и его величина имеет весьма значительное влияние на долговечность каната. В работе было проанализировано влияние угла раскрытия ручья блока на допустимый угол отклонения каната, который сбегает с блока.

Вследствие жесткости каната и того, что его кривизна в зоне набегания на блок меняется не мгновенно, а с некоторой конечной скоростью, при набегании каната на блок, прилегание каната не проходит по всей длине ручья. Приняв закон изменения нагрузки согнутого каната с учетом силы трения между блоком и канатом, было получено формулу для определения угла, на котором канат отходит от блока. Это позволяет получить более реальную картину нагрузки каната, изогнутого на блоке.

Ключевые слова: кран; механизм подъема; канат; канатный блок; контактные напряжения; угол отклонения каната; долговечность каната.

Fidrovskaya N., Pysartsov O., Lomakin A. «Improving the methodology for determining the durability of steel wire ropes»

Current technologies require more and more new standards for the reliability and durability of hoisting ropes. When choosing the design of the steel wire rope it is necessary to consider the conditions in which they will be operated and make calculations based on these conditions. The current standard-based method of calculating the steel wire ropes does not reflect actual steel wire rope operating conditions and does not ensure the required durability. The calculations provided in the course books and reference guides underestimate the impact of the geometric and elastic parameters of the rope sheaves on the durability of the steel wire rope. The rope is selected only based on the conditions on extension, while it has been experimentally proved that the wire breakage occurs precisely in most cases when the rope passes through the sheave.

Considering the forces that arise when a steel wire rope is rolled on a pulley, the dependence of the tension of the rope wire on the transition point is determined, depending on the radius of the pulley, and the angle of the wire twist. When the rope runs on a pulley, the elongation of the wire

on the convex side of the rope, depending on the friction forces, will be distributed to the compression, side on the concave side of the rope. This elongation changes the axial force in the wire.

To ensure the absence of wear of the rope and the sheave, at the point of the rope coming off the sheave, a mathematical relationship has been obtained for the maximum allowable deflection angle of a rope coming off the sheave. The maximum allowable rotation angle of the rope at the point of its detachment from the surface of the sheave has been determined based on the contact of the rope with the sheave rim and prevention of the rope fracture along the edge of the groove rim.

The expansion angle of the sheave groove is determined considering the reduction the torsion of the rope when it is deviated, and its amount has a very significant effect on the durability of the steel wire rope. The thesis contains the analysis of the influence of the expansion angle of the sheave groove on the allowable deflection angle of the rope coming off the sheave.

Due to the inflexibility of the steel wire rope and the fact that its curvature in the zone of winding on the sheave does not change instantly, but with a certain terminal speed, when the rope winds on the sheave, the contact of the rope does not occur along the entire length of the groove. By applying the law of changing the load of a bent rope, taking into account the frictional force between the sheave and the rope, a formula has been obtained to determine the angle at which the steel wire rope comes off the sheave. This provides a more truthful overview of the load of the rope when bent on the sheave.

Keywords: crane, hoisting mechanism, steel wire rope, rope sheave, contact stresses, deflection angle of a steel wire rope, durability of steel wire rope.

Вступ

Метод розрахунку канатів, який застосовується стандартом на теперішній час не відображає дійсних умов роботи канату і не забезпечує його потрібної довговічності. В тих розрахунках, які наводяться в навчальній і довідковій літературі, недооцінюється вплив геометричних і пружних параметрів блоків на довговічність канатів. Канат вибирається тільки з умов на розтягнення, в той час, як експериментально доведено, що розрив дротинки в більшості випадків виникає саме при проходженні канатом блоку.

Експериментальні дослідження, які проводилися Б.С. Ковальським [1], Д.Г. Житковим [2], К.М. Масленіковим [3], А.І. Колчиним [4], І.Ф. Нікітіним [5] та іншими показали, що довговічність канату залежить від його конструкції, режимів експлуатації і не може визначатися тільки статичною міцністю.

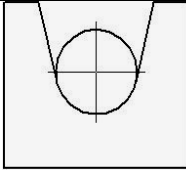
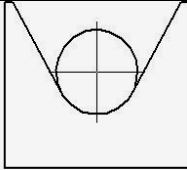
Вважалось, що основною причиною руйнування канату є втома матеріалу. Кожний дріт канату витримує визначену кількість перегинів, тому експериментально необхідно визначати залежність між строком служби канату і різними факторами, які обумовлюють його знос.

1. Аналіз основних досліджень і публікацій

Питаннями комплексних досліджень витривалості сталевих канатів займалися такі вчені як Б.С. Ковальський [1], К.М. Масленіков [3], В. Вернле [6], Н.Є. Маркман [7], Д.Г. Житков [3], В.А. Маліновський [8, 9] та інші.

Були проведені дослідження, які направлені на створення основ будівельної механіки сталевих канатів, яка базується на загальних принципах механіки деформованого тіла і враховує специфіку канату як складного агрегату. М.Ф. Глушко [10] створив основи теорії розрахунку, які дозволяють достатньо точно оцінити величину напружень, які виникають в сталевих підйомних канатах. В роботі [11] досліджувалося кручення канату, яке викликане його девіацією і показано, що воно залежить від кута розкриття рівчака. І чим більше кут девіації тим більше кручення канату (табл.1).

Таблиця 1 – Залежність кручення канату від кута девіації про роботі на блоках з різними кутами розкриття канавки.

Вплив кута девіації та кута розкриття ручія блоку на крутіння сталевго канату діаметром 20,0 мм							
			30 градусів		60 градусів		
Кут девіації, град	1	1,5	2	2,5	3	4	5
Залежність крутіння канату від кута девіації при куті розкриття ручія 30 градусів							
Крутіння від девіації, град/м	172	286	401	516	573	802	976
Залежність крутіння канату від кута девіації при куті розкриття ручія 60 градусів							
Крутіння від девіації, град/м	115	172	229	286	344	401	516

Кут розкриття рівчака блоку визначається із умови зменшення кручення канату при його девіації. В таблиці 1 наведені залежності кручення канату від кута девіації при роботі на шківках з різними кутами розкриття рівчака блоку.

2. Постановка проблеми

Досвід експлуатації показує, що кут розкриття шківка, який рекомендований в нормалях, не відповідає умовам роботи талевих канатів. Бокові поверхні рівчаків шківів, які виконані по цим нормам мають інтенсивний знос в наслідок недостатнього кута розкриття. Тому шківки талевих блоків і крон блоків повинні мати кут розкриття стінок канавки 50° проти 40-45° по ОСТ 24-191-01.

Проведені тести і практика показали, що величина повороту канату навкруги своєї осі залежить від кута розкриття рівчака. Чим більший кут, тим менше буде скручуватися канат. Але багато фірм виготовляють шківки з кутами -30°, 35° та 45°, враховуючи при цьому вимоги різних стандартів.

3. Мета проблеми.

Метою наукового дослідження являється удосконалення методики визначення довговічності канату шляхом урахування нових факторів, які суттєво впливають на роботу канату.

4. Викладення основного матеріалу

Б.С. Ковальський [1] запропонував новий метод розрахунку кранових підйомних канатів на довговічність, який враховує вплив кратності поліспасти і розміри барабану на механізм підйому. Одним з основних параметрів зносу є радіальний тиск канату на блок, який пропорційний натягненню канату T . Радіальний тиск визначає напружений стан дроту в місцях контакту одне з одним і жолобом органу навівки.

Залежність (1.10) можна записати у розгорнутому вигляді

$$D = ABC \frac{\alpha}{\epsilon} d + abc \frac{T}{d} \frac{\ddot{\theta}}{\theta} \quad (1)$$

де α – коефіцієнт, який залежить від матеріалу блоку (сталь – 1,1; чавун – 1,0; дюралюміній – 0,8; капрон – 0,6);

b – коефіцієнт, який відображає вплив радіусу закруглення ручія r і залежить від натягнення канату і напрямку звивання. При запасі міцності $m=5, 6$ значення наведені в табл.2.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнта b

r/d	Звивання	
	хрестове	одностороннє
0,53	1	1
0,56	1,04	1,02
0,60	1,10	1,05
∞	1,30	1,20

c – коефіцієнт, який враховує металеве заповнення перерізу канату. Для шестипасмових канатів типа ТК $c = 0,21$, ЛК $c = 0,20$, для восьми пасових $c = 0,23$.

A – коефіцієнт, який встановлює зв'язок величини D/d з кількістю циклів N .

На основі досліджень на пробіжних машинах може бути встановлена така залежність

$$A = \frac{C\Phi}{1 + \frac{C\Phi}{N}}, \quad (2)$$

На основі експериментів Скобла [12], Вернле [6] та інших $C\Phi = 14,5$, $C\Phi = 56000$.

У межах $N = 30000$, 300000 $A = 0,2\sqrt[3]{N}$;

B – коефіцієнт, який враховує вплив конструкції канату. При межі міцності дроту $s = 1600$, 1800 МПа його значення наведено в табл.3.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнта B

Конструкція	Звивання	
	хрестове	одностороннє
6x19+ОС ТК	1,15	0,95
6x19+ОС ЛК-Р	1,00	0,90
6x37+ОС ТК	1,20	1,10
6x37+ОС ТЛК-О	1,06	0,95

C – коефіцієнт, який враховує вплив розміру дроту на межу витривалості при пульсуючих контактних напруженнях, його значення наведено в табл.4.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнта C

Конструкція канату	d				
	0,96	1	1,04	1,06	1,08
6x37+о.с.	0,96	1	1,04	1,06	1,08
6x19+о.с.	0,94	1	1,06	1,10	1,13

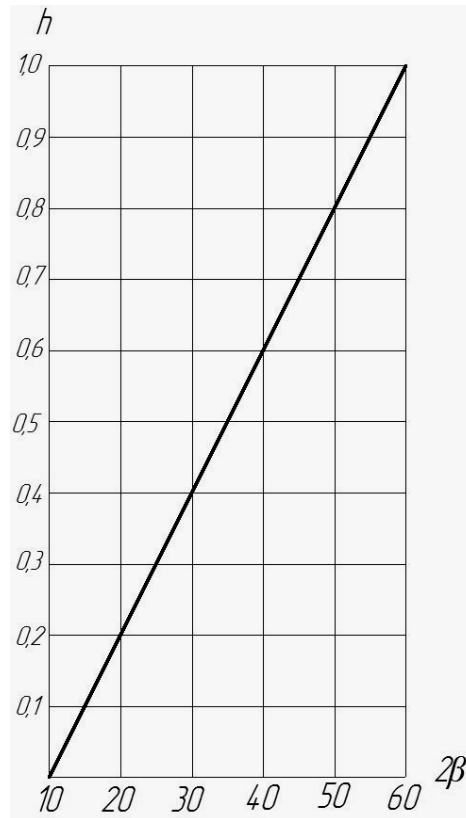
D – діаметр блоку;

d – діаметр канату.

Як було вказано вище, кут розкриття ривчака канатного блоку дуже сильно впливає на довговічність роботи канату, але його не було враховано у формулі Б.С. Ковальського. Нами були проведені експериментальні дослідження, на основі яких була виведена формула для визначення впливу кута розкриття ривчака блоку на довговічність канату

$$h = 0,2(0,2b - 1) \quad (3)$$

Графік залежності коефіцієнту h від кута розкриття ривчака блоку наведена на рис. 1.

Рис. 1 – Залежність коефіцієнта h від кута β

Тоді формула (1) приймає вигляд

$$D = \frac{ABC}{h} \frac{\pi d}{\epsilon} + abc \frac{T}{d} \frac{\ddot{o}}{\varnothing} \quad (4)$$

Висновки.

Аналіз отриманих рішень показав, що крім основних факторів, які включені в методику розрахунку канатів по строку служби Б.С.Ковальським, є ще ряд інших показників, які мають значний вплив і врахування яких допоможе значно підвищити довговічність кранових канатів.

Список использованных источников:

1. Ковальский Б. С. Грузоподъемные машины. Канаты, блоки, барабаны / Б. С. Ковальский. – Харьков : Харьковское высшее командно-инженерное училище, 1991. – 88 с.
2. Житков Д. Г. Стальные канаты для подъемно-транспортных машин / Д. Г. Житков, И. Т. Поспехов. – М. : Металлургиздат, 1993. – 391 с
3. Масленников К. М. Результаты исследования и расчет канатов на прочность и долговечность / К. М. Масленников // Труды ВНИИПТМАШ : Исследование узлов и деталей ПТМ. – М. : 1962. – Вып.7 (29). – С. 45-49.
4. Колчин А. И. Стальные канаты / А. И. Колчин. – М. : Машгиз, 1950. – 102 с.
5. Никитин И. Ф. Изменение усилий в проволоках каната при пробегании его по блоку / И. Ф. Никитин // Вопросы рудничного транспорта : сб. статей. – М. : Недра, 1965. – Вып. 8. – С. 74-79.
6. Woernle R. Drahtseilforschung, Zeit schrift des Vereins deutscher Ingenieure / R. Woernle // Zeitschrift V.D.I. – 1934. – №52. – С. 1492-1498.
7. Опыт эксплуатации канатов с пружинными сердечниками на открытых горных работах / Н. Е. Маркман, А. И. Бурдов, В. Р. Шунин [и др.] // Стальные канаты : сб. – Киев : Техника, 1965. – Вып. 2. – С. 323-324.
8. Малиновский В. А. Стальные канаты. Ч. 1 : Некоторые вопросы технологии, расчета и проектирования / В. А. Малиновский. – Одесса : Астропринт, 2001. – 188 с.
9. Малиновский В. А. Стальные канаты. Ч. 2 : Основы теории изгиба и взаимодействия с опорной поверхностью / В. А. Малиновский. – Одесса : Астропринт, 2002. – 180 с
10. Глушко М. Ф. Стальные подъемные канаты / М. Ф. Глушко. – Одесса : Астропринт, 2013. – 327 с.

11. Свиридов А. А. Влияние геометрии ручья шкива на работу стальных канатов / А. А. Свиридов // Подъемные сооружения. Специальная техника.. – 2018. – Вып. № 8 (191). – С. 19-21.

12. Scobl W. Wire Rope Rescheich Cantee / W. Scobl // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, 2005.

References

1. Kovalskij, BS 1991, Gruzopodjomnye mashiny. Kanaty, bloki, barabany, Harkovskoe vysshee komandno-inzhenernoie uchilishhe, Harkov.

2. Zhitkov, D & Posphehov, I 1993, Stalnye kanaty dlja podemno-transportnyh mashin, Metallurgizdat, Moskva.

3. Maslennikov, KM 1962, 'Rezultaty issledovaniya i raschet kanatov na prochnost i dolgovechnost', Trudy VNIPTMASH : Issledovanie uzlov i detalej PTM, iss. 7(29), pp. 45-49.

4. Kolchin, AI 1950, Stalnye kanaty, Mashgiz, Moskva.

5. Nikitin, IF 1965 'Izmenenie usilij v provolokah kanata pri probeganii ego po bloku', Voprosy rudnichnogo transporta, Moskva, iss. 8, pp. 74-79.

6. Wernle, W 1934, 'Drahtseilforschung Zeitschrift des Yereine Deutscher Ingenieurs', Zeitschrift V.D.I., vol. 78, no. 52, pp. 1492-1498.

7. Markman, NE, Burdov, AI, Shunin, VR & Revzina, FS 1965, 'Opyt jekspluatacii kanatov s pruzhinnyimi serdechnikami na otkrytyh gornyh rabotah', Stalnye kanaty, Tehnika, Kiev, iss. 2, pp. 323-324.

8. Malinovskiy, V 2001, Stalnyye kanaty. Part I. Nekotoryye voprosy tekhnologii, rascheta i proyektirovaniya, Astroprint, Odessa.

9. Malinovskiy, V 2002, Stalnye kanaty. Part 2. Osnovy teorii izgiba i vzaimodeystviya s opornoy poverkhnostyu, Astroprint, Odessa.

10. Glushko, MF 2013, Stalnye podemnye kanaty, Astroprint, Odessa.

11. Sviridov, AA 2018, 'Vlijanie geometrii ruchja shkiva na rabotu stalnyh kanatov', Podemnye sooruzheniya. Specialnaja tehnika, iss. 8 (191), pp. 19-21.

12. Scobl, W 2005, 'Wire Rope Rescheich Cantee', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering.

Стаття надійшла до редакції 10 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-59-65

УДК 621.941.0.15:681.5

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

©Гордєєв А.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Гордєєв Андрій Сергійович: ORCID: 0000-0001-6521-3937; gordeew@ukr.net; доктор технічних наук; професор кафедри інформаційних комп'ютерних технологій і математики; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

Метою роботи є розробка спектральної теорії систем зі змінними параметрами стосовно аналізу якості механічної обробки. Розробка спектральної теорії необхідна для подолання труднощів при проектуванні класу нестационарних систем. При цьому вирішується завдання виявлення закономірностей розсіювання якісних показників при механічній обробці. На основі гармонійного аналізу класифікуються фактори, що впливають на вихідну якість виробів та будується математична модель механічної обробки, що розглядається як полігармонійний процес.

Технологічні системи механічної обробки відносяться до нестационарних систем з силовими і тепловими впливами. Крім того, розподіл похибок механічної обробки на детерміновані і випадкові має багато невизначеності. Наприклад, знос інструменту традиційно відноситься до детермінованих процесів, а з математичної точки зору цей процес описується марковими ланцюгами (апарат, застосовуваний для опису випадкових процесів). У багатьох випадках важко вирішити, чи стосується дане явище до детермінованих або випадковим.

В результаті проведеної роботи було встановлено, що всі обурення, що впливають на процес обробки матеріалів різанням, призводять, в кінцевому підсумку, до відносних зсувів інструменту і заготовки, які можна уявити суперпозицією постійної складової зміщення і окремих гармонік віброзміщення.

Похибка профілю поверхні деталі також може бути представлена суперпозицією постійної складової похибки і її окремих гармонік, що створює передумови ідентифікації окремих гармонік віброзміщення з гармоніками профілю поверхні деталі для прогнозування точності обробки, діагностики причин точнісних відмов і управління точністю.

Ключові слова: точність, якість, механічна обробка, спектральний аналіз, прогнозування, технологія машинобудування.

Гордєєв А.С. «Управление качеством механической обработки»

Целью работы является разработка спектральной теории систем с переменными параметрами применительно к анализу качества механической обработки. Разработка спектральной теории необходима для преодоления трудностей при проектировании класса нестационарных систем. При этом решается задача выявления закономерностей рассеяния качественных показателей при механической обработке; на основе гармонического анализа классифи-

цируются факторы, влияющие на выходное качество изделий; строится математическая модель механической обработки, рассматриваемой как полигармонический процесс.

Технологические системы механической обработки относятся к нестационарным системам с силовыми и тепловыми воздействиями. Кроме того, деление погрешностей механической обработки на детерминированные и случайные имеет много неопределенностей. Например, износ инструмента традиционно относится к детерминированным процессам, а с математической точки зрения этот процесс описывается марковскими цепями (аппарат, применяемый для описания случайных процессов). Во многих случаях трудно решить, относится ли рассматриваемое явление к детерминированным или случайным.

В результате проведенной работы было установлено, что все возмущения, воздействующие на процесс обработки материалов резанием, приводят, в конечном итоге, к относительным смещениям инструмента и заготовки, которые можно представить суперпозицией постоянной составляющей смещения и отдельных гармоник вибросмещений.

Погрешность профиля поверхности детали также может быть представлена суперпозицией постоянной составляющей погрешности и ее отдельных гармоник, что создает предпосылки идентификации отдельных гармоник вибросмещений с гармониками профиля поверхности детали для прогнозирования точности обработки, диагностики причин точностных отказов и управления точностью.

Ключевые слова: точность, качество, механическая обработка, спектральный анализ, прогнозирование, технология машиностроения.

Gordeev A. «Quality Management of Machining»

The aim of the work is to develop the spectral theory of systems with variable parameters in relation to the analysis of the quality of machining. The development of spectral theory is necessary to overcome difficulties in designing a class of non-stationary systems. This solves the problem of identifying patterns of dispersion of quality indicators during machining; On the basis of harmonic analysis, factors that influence the output quality of products are classified; A mathematical model of machining is being considered, considered as a polyharmonic process.

Technological systems of machining relate to non-stationary systems with power and thermal effects. In addition, the division of machining errors into deterministic and random has many uncertainties. For example, tool wear traditionally refers to deterministic processes, and from a mathematical point of view, this process is described by Markov chains (an apparatus used to describe random processes). In many cases, it is difficult to decide whether the phenomenon in question is deterministic or random.

As a result of the work, it was found that all the perturbations that affect the process of processing materials by cutting ultimately lead to relative displacements of the tool and the workpiece, which can be represented by a superposition of the constant component of the displacement and individual harmonics of vibration displacements.

The error of the surface profile of the part can also be represented by a superposition of the constant component of the error and its individual harmonics, which creates the prerequisites for identifying individual harmonics of vibration displacements with harmonics of the surface profile of the part to predict processing accuracy, diagnose the causes of precision failures and control accuracy.

Keywords: accuracy, quality, machining, spectral analysis, forecasting, engineering technology.

Вступ

Одним з важливих показників якості машинобудівної продукції є їх надійність. У проблемі збільшення надійності машинобудівної продукції якість поверхні завжди мало велике значення. Опубліковано значну кількість праць, в яких викладаються теоретичні положення точності обробки і прийоми технічного аналізу якості конструкцій і технологи чеського процесу виготовлення [1-15]. У результаті цих досліджень накопичені необхідні дані для розрахунку точності технологічних процесів. А.Б. Яхин запропонував методи розрахунку деяких складових сумарної похибки обробки і оцінки точності процесів механічної обробки, засновані на положеннях теорії ймовірностей і математичної статистики. Потім А.П.Соколовський розвинув розрахунково-аналітичний метод точнісних розрахунків, що враховує вплив технологічної системи під дією зусиль різання, неточності обладнання, зносу інструменту, похибкою ти налагодження, температури і ін. [2]. С.А.Васін запропонував аналітичний метод дослідження питань точності механічної обробки [1]. Роботи А.Г.Суслова пов'язані з проблемами отримання необхідної точності обробки шляхом управління деформації ями технологічної системи [4].

У роботах [7, 8, 10], присвячених аналізу точності обробки на металорізальних верстатах, передбачається, що обурення, що впливають на процес, викликають пружні переміщення ланок технологічної системи .

Аналіз застосовуваних в даний час методів оцінки і управління сумарною похибкою обробки дозволив прийти до висновку про актуальність вирішення завдань управління якістю механічної обробки. Метою роботи є розробка спектральної теорії систем зі змінними параметрами стосовно аналізу якості механічної обробки. Розробка спектральної теорії необхідна для подолання труднощів при проектуванні класу нестационарних систем. При цьому вирішується завдання виявлення закономірностей розсіювання якісних показників при механічній обробці.

Класифікація факторів, що впливають на якість механічної обробки

Технологічні системи механічної обробки і відносяться до нестационарним системам з силовими і тепловими впливами. Наприклад, знос інструменту традиційно відноситься до детермінованим процесів, а з математичної точки зору цей процес описується марковими ланцюгами (апарат, застосовуваний для опису випадкових процесів). У багатьох випадках важко вирішити, чи стосується дане явище до детермінованим або випадковим.

Форма спектральних алгоритмів не залежить від виду базисної системи функцій, що надає спектральному аналізу простоту і універсальність. Від виду базисної системи залежать лише чисельні вираження спектральних характеристик систем. З урахуванням вище сказаного автором була розроблена класифікація похибок й механічної обробки (табл. 1), яка дозволяє вирішувати основні теоретичні завдання аналізу, синтезу і експериментального дослідження технологічних систем зі змінними параметрами як при детермінованих, так і при випадкових взаємодіях.

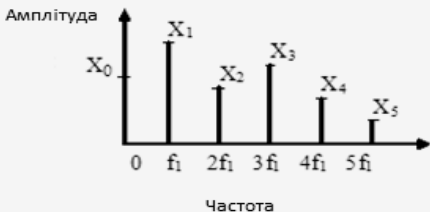
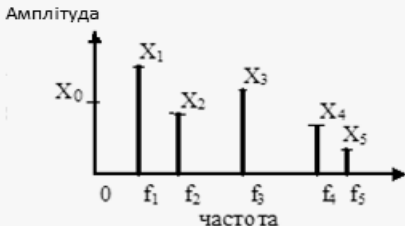
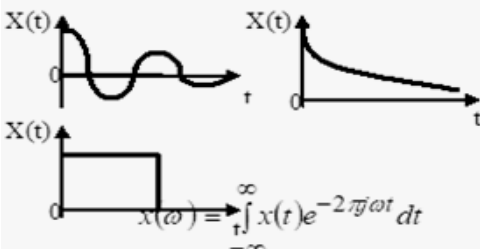
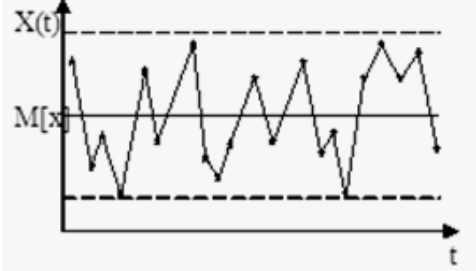
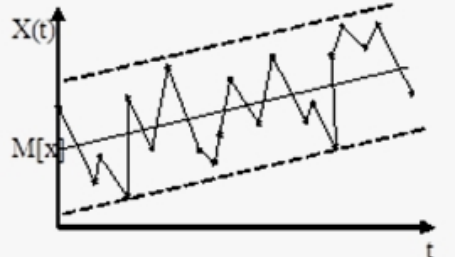
Параметричні збурення можуть бути як періодичними, так і неперіодичними. Динамічні деформації виникають зазвичай при періодичних параметричних збурень, пов'язаних зі змінною жорсткістю системи ВПД. Дуже часто при дослідженні динамічних процесів доводиться стикатися з аналізом можливих впливів, природа яких нам повністю не ясна. Ці дії можуть бути викликані як зовнішніми неконтрольованими збуреннями, так і неконтрольованими змінами геометрії і параметрів системи. Процеси, що описують детерміновані явища, можуть бути періодичними або неперіодичними. У свою чергу періодичні процеси можна розділити на гармонійні і полігармонійні. До неперіодичних відносяться майже періодичні і перехідні процеси. Можна привести багато прикладів фізичних явищ, які з достатньою для практики наближенням описуються гармонійними процесами. До їх числа відносяться коливання частоти обертання шпинделя, вібрації верстата на холостому ході і інші явища.

Хвилястість оброблених поверхонь має синусоїдальний характер, що є наслідком коливань системи СПД, що виникають через нерівномірність сил різання, наявності невідно-важених мас, похибок приводу. З точки зору аналізу гармонійні процеси представляють собою одну з найпростіших форм функції часу. До полігармонійних відносяться такі типи випадкових процесів, які можуть бути описані функцією часу, точно повторює свої значення через однакові інтервали $x(t)=x(t)nTp)$, $n=1, 2, 3, \dots$. За деякими винятками, полігармонійні процеси можуть бути представлені поруч Фур'є.

Явища, яким відповідають полігармонійні процеси, зустрічаються набагато частіше явищ, описуваних чисто гармонійною функцією. Насправді, коли той чи інший процес відносять до типу гармонійних, то найчастіше при цьому мають на увазі тільки його наближене уявлення, хоча насправді він є полігармонійні. Наприклад, при ретельному дослідженні профілограм хвилястості поверхні можна виявити невеликі коливання з частотами вищих гармонік. В інших випадках в періодичному фізичному процесі можуть бути присутніми гармонійні компоненти з відносно великими амплітудами. Наприклад, вібрації агрегатного верстата, що працює декількома інструментами, містять зазвичай інтенсивну гармонійну компоненту. До полігармонійних випадкових процесів, як буде показано далі, відносяться також розсіювання дійсних розмірів при механічній обробці і профілограми мікронеровностей оброблених поверхонь.

Майже періодичні процеси можна описати рядом гармонійних коливань, частоти яких порівнянні. Майже періодичні процеси можуть бути описані функцією часу.

Таблиця 1 - Класи процесів властивих механічній обробці

Клас	Підклас	Вид	Вид що описує функції	Фактори
Детерміновані	Періодичні	Полігармонійні	$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi\omega t + b_n \sin 2\pi\omega t)$ 	Коливання частоти обертання шпинделя. Вібрації верстата на холостому ході. Хвилястість оброблених поверхонь. Вібрації обладнання під час обробки. Розсіювання розмірів. Якість оброблених поверхонь.
	Неперіодичні	Майже періодичні	 $x(t) = X_1 \sin(2t + \varphi_1) + X_2 \sin(3t + \varphi_2) + \dots$	Вібрації устаткування що працює в асинхронному режимі
	Неперіодичні	Перехідні		Знос ріжучого інструменту. Вільні коливання інерційної частини механічної системи після припинення дії вимушеної сили. Зміна зусилля на механізми верстата після припинення різання.
Випадкові	Стационарні	Ергодичні		Нерівномірність припуску. Неоднорідність оброблюваного матеріалу. Шорсткість оброблених поверхонь.
	Нестационарні	Окремі випадки		Похибка базування

Явища, яким відповідають майже-періодичні процеси, зустрічаються досить часто при підсумовуванні двох і більше незалежних гармонійних процесів. Прикладом майже-періодичного явища може служити вібрація обладнання, що працює в асинхронному режимі.

До перехідних неперіодичних процесів відносяться всі неперіодичні процеси, які не є майже періодичними процесами. Іншими словами, перехідні процеси включають в себе все не розглянуті раніше процеси, які можуть бути описані відповідними функціями часу. Явища, яким відповідають перехідні процеси, досить численні і різноманітні. Наприклад, процес зносу ріжучого інструменту, вільні коливання інерційної механічної системи після припинення дії сили, що вимушує, зміна зусилля на механізми верстата після припинення різання. Важлива відмінність перехідних процесів від періодичних і майже-періодичних полягає в тому, що їх неможливо уявити за допомогою дискретного спектра частот. Однак в більшості випадків отримують безперервне спектральне подання перехідних процесів, використовуючи інтеграл Фур'є.

Процеси, що відповідають випадковим фізичним явищам, не можна описати точними математичними співвідношеннями, оскільки результат кожного спостереження не підлягає відтворенню. З таблиці 1 видно, що фактори, що визначають якість механічної обробки (точність, шорсткість, хвилястість), мають полігармонійну природу. Це означає, що вони не є строго випадковими і підлягають прогнозуванню. Даний факт відкриває можливість використовувати системи управління якістю механічної обробки, засновані на прогнозуванні.

Висновки

Все обурення, що впливають на процес обробки матеріалів різанням, призводять, в кінцевому підсумку, до відносних зсувів інструменту і заготовки, які можна уявити суперпозицією постійної складової зміщення і окремих гармонік віброзміщення. Похибка профілю поверхні деталі також може бути представлена суперпозицією постійної складової похибки і її окремих гармонік, що створює передумови ідентифікації окремих гармонік віброзміщення з гармоніками профілю поверхні деталі для прогнозування точності обробки, діагностики причин точнісних відмов і управління точністю.

Список использованных источников:

1. Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С. А. Васин. – М. : Машиностроение, 2006. – 384 с.
2. Максаров В. В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностного слоя на основе моделирования переходных процессов / В. В. Максаров, Р. В. Вьюшин, А. Е. Ефимов // *Металлообработка*. – 2017. – № 2. – С. 39-45.
3. Максаров В. В. Теория и практика моделирования и управления в области прогнозирования динамических свойств технологических систем / В. В. Максаров, Ю. Ольт // *Металлообработка*. – 2012. – № 2. – С. 7-13.
4. Наукоемкие технологии в машиностроении / А. Г. Суслов, Б. М. Базров Б. Ф. Безъязычный [и др.]. – М. : Машиностроение, 2012. – 528 с.
5. Fan X. The influence of cutting force on surface machining quality / X. Fan, M. Loftus // *International Journal of Production Research*. – 2007. – Vol 45, No. 4. – Pp. 899-911.
6. Nguyen H. T. Surface Roughness Analysis in the Hard Milling of JIS SKD61 Alloy Steel / H. T. Nguyen, Q. C. Hsu // *Applied Sciences*. – 2016. – No. 6. – Pp. 172.

7. Asiltürk I. Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis / I. Asiltürk, S. Neşeli // *Measurement*. – 2012. – Vol. 45 (4). – Pp. 785-794.
8. Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel / L. Bouzid, S. Boutabba, M. A. Yallese [et al.] // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 74 (5-8). – Pp. 879-891.
9. Cutting force prediction for five-axis ball-end milling considering cutter vibrations and run-out / S. B. Wang, L. Geng, Y. F. Zhang [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 96. – Pp. 206-215.
10. Jeyakumar S. Prediction of cutting force, tool wear and surface roughness of Al6061/SiC composite for end milling operations using RSM / S. Jeyakumar, K. Marimuthu, T. Ramachandran // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2013. – Vol. 27 (9). – Pp. 2813-2822.
11. Simulation of three-dimension cutting force and tool deflection in the end milling operation based on finite element method / R. J. Saffar, M. R. Razfar, O. Zarei [et al.] // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2008. – Vol. 16. – Pp. 1677-1688.
12. Kivak T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts / T. Kivak // *Measurement*. – 2014. – Vol. 50. – Pp. 19-28.
13. Wojciechowski S. The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces / S. Wojciechowski // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2015. – Vol. 89. – Pp. 110-123.
14. Altintas Y. *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design* / Y. Altintas. – Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo, Delhi, Tokyo, Mexico City : Cambridge university press, 2012. – 366 p.

References

1. Vasin, SA 2006, *Prognozovanie vibroustojchivosti instrumenta pri tochenii i frezerovanii*, Mashinostroenie, Moskva.
2. Maksarov, VV, Vjushin, RV & Efimov, AE 2017, 'Tehnologicheskoe obespechenie sherohovatosti poverhnostnogo sloja na osnove modelirovaniya perehodnyh processov', *Metalloobrabotka*, no. 2, pp. 39-45.
3. Maksarov, VV & Olt, Ju 2012, 'Teoriya i praktika modelirovaniya i upravleniya v oblasti prognozirovaniya dinamicheskikh svoystv tehnologicheskikh sistem', *Metalloobrabotka*, no. 2, pp. 7-13.
4. Suslov, AG, Bazrov, BM, Bezjazychnyj, BF et al. 2012, *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, Mashinostroenie, Moskva.
5. Fan, X & Loftus, M 2007, 'The influence of cutting force on surface machining quality', *International Journal of Production Research*, vol. 45, no. 4, pp. 899-911.
6. Nguyen, HT & Hsu, QC 2016, 'Surface Roughness Analysis in the Hard Milling of JIS SKD61 Alloy Steel', *Applied Sciences*, no. 6, pp. 172.
7. Asiltürk, I & Neşeli, S 2012, 'Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis', *Measurement*, vol. 45 (4), pp. 785-794.
8. Bouzid, L, Boutabba, S, Yallese, MA, Belhadi, S & Girardin, F 2014, 'Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 74 (5-8), pp. 879-891.
9. Wang, SB, Geng, L, Zhang, YF, Liu, K & Ng, TE 2015, 'Cutting force prediction for five-axis ball-end milling considering cutter vibrations and run-out', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, pp. 206-215.
10. Jeyakumar, S, Marimuthu, K & Ramachandran, T 2013, 'Prediction of cutting force, tool wear and surface roughness of Al6061/SiC composite for end milling operations using RSM', *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27 (9), pp. 2813-2822.
11. Saffar, RJ, Razfar, MR, Zarei, O & Ghassemieh, E 2008, 'Simulation of three-dimension cutting force and tool deflection in the end milling operation based on finite element method', *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 16, pp. 1677-1688.
12. Kivak, T 2014, *Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts*, *Measurement*, vol. 50, pp. 19-28.
13. Wojciechowski, S 2015, 'The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 89, pp. 110-123.
14. Altintas, Y 2012, *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, Cambridge university press, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo, Delhi, Tokyo, Mexico City.

Стаття надійшла до редакції 16 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-66-73

УДК 621.791.042

РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ РОБОЧОЇ ЧАСТИНИ МЕТАЛОРИЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

©Ізотова. К.О.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Ізотова Катерина Олександрівна: ORCID 0000-0002-6585-6681, itmzv@upr.edu.ua, кандидат технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні і зварювального виробництва, Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мета роботи полягає у продовженні строку служби металорізального інструменту шляхом наплавлення електродами легованими W, C, B, Ti і рідкоземельними металами (РЗМ), для підвищення теплостійкості й зносостійкості різцевого й штампового інструменту.

Були виготовлені електроди із дроту Св-08А з рутил-фтористокальцієвим покриттям. У якості розкислювачів застосовували феромарганець і феротитан. Хром, молібден і ванадій вводили у вигляді феросплавів, а вуглець у вигляді графіту сріблястого й карбідів кремнію, титана й вольфраму. З метою зниження вартості електродів карбіди W, Ti, Si, а також кобальт вводили в шихту покриття у вигляді відходів від заточення твердосплавного інструмента зі сплавів Т30К4, Т15К6, ВК8 і ін.

Покриття наносилися на стрижні пресовим способом. Для досліджень робили наплавлення розміром 80х20х20 мм.

Твердість наплавленого металу перевіряли на поверхні восьмишарового наплавлення, виконаного для контролю хімічного складу наплавленого металу.

Нагрівання наплавлень під загартування здійснювався в соляній хлорбарієвій ванні до температури 1225°C. Витримка при цій температурі становила 20 хв. Загартування проводилося маслі. Дослідження ріжучих властивостей наплавлень проводилося з використанням методу торцевого обточування.

Електрод №1 призначений для зносостійкого наплавлення ріжучих крайок обрізних штампів. Електрод №3 призначений для наплавлення обрізних матриць. Електрод №2 для наплавлення робочої частини різців і ножів для різання металу. Зносостійкість різців наплавлених електродом №2 не поступається різцям, виготовленим зі сталі Р6М5. Стійкість же обрізних матриць зі сталі 45 із запропонованим наплавленням вище в 8-10 разів у порівнянні з матрицями зі сталі 5ХНМ.

Ключові слова: зносостійкість, легування, електроди, дугове наплавлення, металоріжучий інструмент, твердість.

Ізотова Е.А. «Разработка электродов для наплавки рабочей части металлорежущего инструмента»

Цель работы заключается в продлении срока службы металлорежущего инструмента путем наплавки электродами легированными W, C, B, Ti и редкоземельными металлами (РЗМ), для повышения теплостойкости и износостойкости резцового и штампового инструмента.

Были изготовлены электроды из проволоки Св-08А с рутил-фтористокальциевым покрытием. В качестве раскислителей применяли ферромарганец и ферротитан. Хром, молибден и ванадий вводили в виде ферросплавов, а углерод в виде графита серебристого и карбидов кремния, титана и вольфрама. С целью снижения стоимости электродов карбиды W, Ti, Si, а также кобальт вводили в шихту покрытия в виде отходов от заточки твердосплавного инструмента из сплавов Т30К4, Т15К6, ВК8 и др.

Покрытие наносились на стержни прессовым способом. Для исследований делали наплавки размером 80x20x20 мм.

Твердость наплавленного металла проверяли на поверхности восьмислойной наплавки, выполненной для контроля химического состава наплавленного металла.

Нагрев наплавки под закалку осуществляли в соляной хлорбариевой ванне до температуры 1225°C. Выдержка при этой температуре составляла 20мин. Закалка проводилась масле.

Исследование режущих свойств наплавки проводилось с использованием метода торцевой обточки.

Электрод №1 предназначен для износостойкой наплавки режущих кромок обрезных штампов. Электрод №3 предназначен для наплавки обрезных матриц. Электрод №2 для наплавки рабочей части резцов и ножей для резки металла. Износостойкость резцов наплавленных электродом №2 не уступает резцам, изготовленным из стали Р6М5. Стойкость же обрезных матриц из стали 45 с предложенной наплавкой выше в 8-10 раз по сравнению с матрицами из стали 5ХНМ.

Ключевые слова: износостойкость, легирование, электроды, дуговая наплавка, металлорежущий инструмент, твердость.

Izotova E. «Development of electrodes for surfacing the working part of a metal-cutting tool»

The purpose of the work is to extend the service life of metal cutting tools by surfacing with alloyed electrodes W, C, B, Ti and rare-earth metals (REM), to increase the heat resistance and wear resistance of the cutting and stamping tools.

Electrodes were made from Sv-08A wire with rutile-fluorocarbon coating. Ferromanganese and ferrotitanium were used as deoxidants. Chromium, molybdenum and vanadium were introduced in the form of ferroalloys, and carbon in the form of silver graphite and silicon carbides, titanium and tungsten. In order to reduce the cost of electrodes, carbides W, Ti, Si, as well as cobalt were

introduced into the charge of the coating in the form of waste from sharpening carbide tools from alloys T30K4, T15K6, VK8, etc.

The coating was applied to the rods by a press method. For research did surfacing size 80x20x20 mm.

The hardness of the deposited metal was checked on the surface of the eight-layer surfacing, made to control the chemical composition of the deposited metal.

The surfacing for hardening was carried out in a salt chlorobarium bath to a temperature of 1225 ° C. The exposure at this temperature was 20 min. Quenching was carried out in oil.

The study of the cutting properties of surfacing was carried out using the end turning method.

The №1 electrode is designed for wear-resistant surfacing of cutting edges of cut dies. Electrode No. 3 is intended for surfacing of edged dies.. №2 electrode for surfacing the working part of cutters and knives for metal cutting. The wear resistance of the cutters surfaced by the №2 electrode is not inferior to the cutters made of P6M5 steel. The resistance of the cut matrices from steel 45 with the proposed surfacing is 8-10 times higher compared to the matrices from 5XHM steel.

Keywords: wear resistance, alloying, electrodes, arc surfacing, metal cutting tool, hardness.

Постановка проблеми

За останні роки досягнуті значніші успіхи в економії дорогих металів і твердих сплавів при виготовленні складних різальних інструментів.

Продуктивним і ефективним способом виготовлення складного інструмента, у якому робоча частина складається зі швидкорізальної сталі або твердого сплаву, а неробоча частина - з інструментальної вуглецевої або конструкційної сталі, є електродугове наплавлення. Крім того, наплавлення - найбільш універсальний метод відновлення зношених робочих поверхонь інструмента, що дозволяє поліпшити якість і знизити вартість відновлених деталей [1].

Найчастіше наплавляють робочі зносостійкі шари штампів, призначених для холодно-го й гарячого деформування металу, робочі поверхні різців, крайки ножів для різання й обрубки металу з метою підвищення властивостей робочої частини інструмента або їхнього відновлення. Наплавлення робочого шару повинне забезпечити головним чином збільшення зносостійкості та теплостійкості.

Для цієї мети розробляються й впроваджуються нові наплавочні матеріали, леговані тугоплавкими з'єднаннями, що характеризуються високою твердістю, підвищеним опором зношування, значною теплостійкістю, тому розробка нових економнолегованих наплавочних електродів є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень

Матеріал різального інструменту повинен мати високу твердість для надійної роботи протягом тривалого часу. Значне підвищення твердості інструментального матеріалу по по-

рівняння із твердістю оброблюваної заготівлі повинне зберігатися й при нагріванні інструмента в процесі різання.

Оскільки штампи холодного висадження й обробки сприймають значні динамічні навантаження варто обмежувати граничну твердість, як правило, не вище HRC 60.

Перераховані експлуатаційні властивості інструмента можна досягти шляхом легування. Вміст карбідоутворюючих елементів і вуглецю повинен забезпечити одержання найбільш багатих по легуванню карбідів при мінімальному переході легуючих елементів у твердий розчин основи [2].

Виходячи з вартості різних легуючих добавок і властивостей утворених ними твердих фаз, найбільш раціональними для створення зносостійких, теплостійких і міцних наплавлень прийнято вважати хром, марганець, нікель, бор. Такі елементи як Mo, W, V, C, Ti застосовувалися в менших обсягах у зв'язку з тим, що вони дефіцитні й дорогі. Однак останнім часом спостерігається тенденція до все більшого використання цих легуючих елементів [3, 4].

В останні роки для поліпшення ряду властивостей наплавочних матеріалів почали застосовувати мікродобавки рідкоземельних металів (РЗМ). Мікролегування рідкоземельними металами істотно впливає на величину зерна, на стан границь зерен.

У цей час для одержання наплавочних матеріалів для робочих частин ріжучого й штампового інструмента усе більш широке поширення одержують такі системи легування: W-V-B; Fe - C-Cr; Cr-Mo-W-Co-B-T [5].

Структура таких наплавлених металів складається з легованого твердого розчину (мартенситу й залишкового аустеніту), насиченого зміцнюючими карбідоборидними й інтерметалідними фазами, чим і обумовлюється висока зносостійкість, теплостійкість і теплопровідність цих сплавів [5, 6].

Для відновлення й зміцнення швидкозношуваних деталей штамів (матриць, пуансонів) рекомендуються електроди марок ЭН-60М, ОЗШ-1.

Однак названі електроди не забезпечують належної стійкості інструмента через викрашування наплавлень у процесі експлуатації, появи тріщин на замкнутих швах. Наплавлення даними електродами дозволяє підвищити стійкість обрубних штамів усього лише на 20% [6,7].

Застосування для зміцнення ріжучих крайок інструмента електродів ОЗИ - 1, ОЗИ - 2, ОЗИ - 3, ЦИ - 1М, ОЛН - 1 і їм подібних економічно недоцільно, через великий вміст у їхньому покритті дефіцитних дорогих елементів - ванадію, вольфраму, молібдену й ін.

Постановка завдання досліджень

Завданням даного дослідження являється продовження строку служби металоріжучого інструменту шляхом наплавлення спеціальними електродами.

Електрод також повинен мати гарні технологічні властивості, дозволяти робити багаторазове наплавлення деталей, зберігаючи при цьому необхідні експлуатаційні характеристики інструмента. При цьому треба дослідити вплив легуючих елементів на твердість напла-

вленого металу. Дослідити можливість введення в шихту покриття відходів від заточення твердосплавного інструмента. Розробити склад газшлакоутворюючої частини шихти покриття електродів. Дослідити вплив термічної обробки на твердість наплавленого металу. Дослідити ріжучі властивості дослідних наплавлень.

Експериментальна частина

Для досліджень були виготовлені 5 варіантів електродів із дроту Св-08А з покриттям, легованим різними елементами. У якості розкислювачів застосовували феромарганець і феротитан. Хром, молібден і ванадій вводили у вигляді феросплавів, а вуглець у вигляді графіту сріблястого й карбідів кремнію, титана й вольфраму. Для підвищення зносостійкості, а також зниження газонасиченості до складу покриття вводили 0,5-1,0% Y_2O_3 . З метою поліпшення оброблюваності наплавленого металу до складу покриття електрода вводили бор. Твердість наплавленого металу перевіряли на поверхні восьмишарового напавлення, виконаного для контролю хімічного складу наплавленого металу.

У табл. 1 наведені склад шихти покриття дослідних електродів. З метою зниження вартості електродів карбіди W, Ti, Si, а також кобальт вводили в шихту у вигляді відходів від заточення твердосплавного інструмента зі сплавів Т30К4, Т15К6, ВК8 і ін. Покриття наносилися пресовим способом. Для досліджень робили напавлення розміром 80x20x20 мм. Нагрівання напавлень під загартування здійснювався в соляній хлорбарієвій ванні до температури 1225°C. Витримка при цій температурі становила 20 хв. Загартування проводилося маслі.

Таблиця 1 - Склад шихти покриття електродів

Компоненти покриття	Варіанти електродів				
	1	2	3	4	5
Мармур	24,0	24,0	20,0	28,0	26,0
Плавиковий шпат	10,0	10,0	10,0	10,8	10,0
Рутил	5,0	5,0	5,0	5,0	4,5
$FeSi$	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
FeMn	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5
FeCr	7,0	7,0	6,0	6,2	6,5
FeMo	10,0	10,0	10,0	15,0	15,0
FeV	5,0	5,0	6,0	5,0	5,0
Графіт	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0
Слюда	5,0	5,0	5,0	5,0	3,0
Сода	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Y_2O_3	1,0	(Y)1,0	0,5	(Y)0,3	(Y)0,3
FeTi	3,0	3,0	2,0	немає	немає
FeBAl	0,3	1,0	немає	немає	(FeB)3
Реліт	12,0	12,0	немає	немає	немає
Відходи	13,2	13,2	32,0	(Т30К4)20,0	(ВК8)20,0

Після загартування напавлення піддавалися відпалу. Згідно вольфрамомолібденові сталі здобувають максимальну вторинну твердість після відпалу при 540-660°C.

Залишковий аустеніт сталей з молібденом також менш стійкий проти відпалу, у порівнянні з вольфрамовими сталями, і перетворюється головним чином при однократному відпалі. Дня зняття напруг у сталей, що містять більше 3-4% Мо достатній двократний відпал.

Досліджувані наплавлення піддавалися двократному відпалу при температурі 560°C з витримкою при цій температурі 1 годину й наступному охолодженню на повітрі. З метою зниження вартості електродів карбіди W, Ti, Si, а також кобальт вводили в шихту покриття у вигляді відходів від заточення твердосплавного інструмента зі сплавів Т30К4, Т15К6, ВК8 і ін.

Хімічний склад використовуваних відходів зазначений у табл. 2.

Таблиця 2 - Хімічний склад відходів

№ п/п	Елементи	Кількість, %
1	Карбід кремнію зелений	50,0 – 60,0
2	Монокарбід вольфраму	7,0 – 11,0
3	Монокарбід титана	0,7 – 1,2
4	Вільний вуглець	0,1
5	Кобальт	0,8 – 1,2
6	Залізо	28,0 – 36,0

Дослідження ріжучих властивостей наплавлень проводилося з використанням існуючого методу торцевого обточування, що володіє рядом переваг перед іншими експресними методами.

Результати досліджень

Результати аналізу хімічного складу наплавленого металу представлені в табл. Мікроструктура металу, наплавленого електродом №1, після термічної обробки являє собою високолегований мартенсит, карбіди орієнтовані по сітці, залишковий аустеніт < 5%. Твердість наплавлення - *HRC* 54-56.

Таблиця 3 – Хімічний склад металу, наплавленого дослідними електродами.

№ п/п	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Ti	B	Co	Al
1	0,9	0,42	1,71	0,35	3,1	8,7	1,2	0,11	0,35	-	0,27
2	1,11	0,43	1,99	0,35	3,5	9,3	1,2	0,15	0,25	-	0,18
3	1,0	0,3	0,8	3,0	6,0	7,0	1,5	-	1,2	0,5	-
4	0,9	0,5	0,3	3,0	6,0	5,0	1,3	1,0	0,01	0,2	-
5	0,9	0,4	1,9	1,3	3,0	2,2	1,0	0,05	0,01	0,2	-

Метал, наплавлений електродом №2, після термообробки також має структуру голчастого мартенситу, карбіди сітчастого розташування, крім того, дрібні карбіди усередині зерна й залишковий аустеніт у кількості 5-7%. Твердість наплавленого металу *HRC* 55-57.

Метал, наплавлений електродом №3, після термообробки також має структуру голчастого мартенситу, карбіди сітчастого розташування, крім того, дрібні карбіди усередині зерна й залишковий аустеніт у кількості 5-7% (рис. 1). Твердість наплавленого металу *HRC* 55-57.

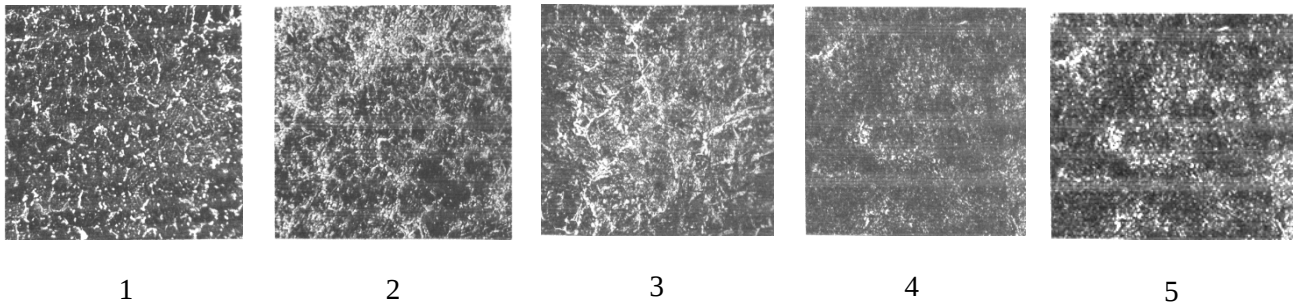


Рис.1 - Мікроструктура металу, наплавленого електродами 5 варіантів після термічної обробки; ($\times 450$)

Мікроструктура металу, наплавленого електродом №4, являє собою мартенсит, велике кількість дрібних карбідів сферовидної і пластинчастої форми, голчасті бориди. Твердість наплавленого металу *HRC* 64-67.

Термооброблене наплавлення, виконане електродом №5 має структуру мартенситу й карбіди сітчастого розташування. Незначна кількість залишкового аустеніту виявленого рентгенографічно. Твердість наплавленого металу *HRC* 58-60.

Випробування дослідних різців на зносостійкість. Обробка результатів експериментів дозволила представити наступні висновки:

Найкращою стійкістю володіють різці, ріжуча частина яких наплавлена електродами №1. Після термічної обробки рівень стійкості їх $V_{60}=45$ м/хв. Однак, слід зазначити підвищену крихкість ріжучої крайки, що обумовлено вмістом великої кількості бору - 1 - 1,2 %.

Трохи уступають їм по стійкості різці, наплавлені електродом №2. Після термічної обробки рівень стійкості їх $V_{60}=42$ м/хв.

Стійкість різців, наплавлених електродом №2 після термічної обробки $V_{60}=40$ м/хв.

Різці, наплавлені електродами №3 і №4 після термічної обробки мають приблизно однаковий рівень стійкості $V_{60}= 30-31$ м/хв.

Очевидно, це обумовлено відсутністю в наплавленому металі хрому.

Висновки

Розроблено електрод №1 призначений для зносостійкого наплавлення ріжучих крайок обрізних штампів.. Електрод №3 призначений для наплавлення обрізних матриць. Електрод №2 для наплавлення робочої частини різців і ножів для різання металу. Зносостійкість різців наплавлених електродом №2 не поступається різцям, виготовленим зі сталі Р6М5. Стійкість же обрізних матриць зі сталі 45 із запропонованим наплавленням вище в 8-10 разів у порівнянні з матрицями зі сталі 5ХНМ.

Список використаних джерел:

1. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов / В. В. Рыбин. – М. : Металлургия, 1986. – 224 с.
2. Кальянов В. Н. Свариваемость наплавляемых мартенситных сталей с инструментальными сталями / В. Н. Кальянов, В. А. Багров // Сварочное производство. – 1998. – №4. – С. 14-15.
3. Рыбакова Л. М. Структура и износостойкость металла / Л. М. Рыбакова, Л. И. Куksenova. – М. : Машиностроение, 1982. – 212 с.
4. Кальянов В. Н. выбор наплавочных материалов в зависимости от вида износа / В. Н. Кальянов, В. А. Багров // Состояние и перспективы развития сварочных материалов в странах СНГ: Сб. докладов I-й Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ Краснодар, 22-26 июня 1998 г. – М. : 1998. – С. 173-175.
5. Tuttle R. Effect of rare earth addition on grain refinement of plain carbon steels / R. Tuttle // International Journal of Metalcasting. – 2012. – Vol. 6 (2). – Pp. 51-63.
6. Effect of Ce on inclusions and impact property of 2Cr13 stainless steel / X. Liu, J.-C. Yang, L. Yang // Journal of Iron and Steel Research International. – 2010. – Vol. 17. – Pp. 59-64.

References

1. Rybin, VV 1986, Bolshie plasticheskie deformacii i razrushenie metallov, Metallurgija, Moskva.
2. Kaljanov, VN & Bagrov, VA 1998, 'Svarivaemost naplavljaemyh martensitnyh stalej s instrumentalnymi staljami', Svarochnoe proizvodstvo, no. 4, pp. 14-15.
3. Rybakova, LM & Kuksenova, LI 1982, Struktura i iznosostojkost metalla, Mashinostroenie, Moskva.
4. Kaljanov, VN & Bagrov, VA 1998, 'Vybor naplavochnyh materialov v zavisimosti ot vida iznosa', Sostojanie i perspektivy razvitija svarochnyh materialov v stranah SNG, Moskva, pp. 173-175.
5. Tuttle, R 2012, 'Effect of rare earth addition on grain refinement of plain carbon steels', International Journal of Metalcasting, no. 1, pp. 51-63.
6. Liu, X, Yang, JC, Yang, L & Gao, XZ 2010, 'Effect of Ce on inclusions and impact property of 2Cr13 stainless steel', Journal of Iron and Steel Research International, no. 17, pp. 59-64.
- Puzrjakov, AF 2003, Teoreticheskie osnovy tehnologii plazmennogo napylenija, Izdatelstvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta imeni N. Je. Baumana, Moskva.
2. Rusev, GM et al. 2000, 'Tehnologija vosstanovlenija i uprochnenija naruzhnyh i vnutrennih poverhnostej plazmennym napyleniem', Avtomaticheskaja svarka, no. 12, pp. 61-62.
3. Luzan, SO & Deriabkina, ES 2009, Sposib napyliuvannia hazotermichnoho poroshkovoho pokryttia, UA Patent 44994.
4. Poljanskij, AS, Luzan, SA & Derjabkina, ES 2011, 'Obosnovanie vozmozhnosti podgotovki poverhnosti metallichesкими shhetkami dlja gazotermicheskogo napylenija pokrytij', Pratsi Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu, Melitopol, iss. 11, vol. 1, pp. 34-42.
5. Robert Eriksson, " Thermal Barrier Coatings – Durability Assessment and Life Prediction," Linköping Studies in Science and Technology, Dissertation No.1527, August-2013.
6. S. Matthews and B. James, " Review of Thermal Spray Coating Applications in the Steel Industry: Part 1—Hardware in Steel Making to the Continuous Annealing Process," Journal of Thermal Spray Technology, Volume 19(6), December 2010, pp.1267.

Стаття надійшла до редакції 16 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-74-79

УДК 621.791.042

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РУТИЛОВИХ ЕЛЕКТРОДІВ**©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 інтегрованих технологій в машинобудуванні і зварювального виробництва, Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Метою розробки є підвищення продуктивності й зварювально-технологічних властивостей рутилових електродів за рахунок використання залізного порошку в якості дешевого й ефективного наповнювача при зварюванні плавленням.

Розроблено методику розрахунку показників продуктивності, що дозволяє визначити коефіцієнти наплавлення, розплавлення й інші параметри електродів із залізним порошком у покритті, залежно від вмісту залізного порошку в покритті й режиму зварювання.

Досліджено механізм процесу утворення газових порожнин при багатошаровому наплавленні високопродуктивними електродами із залізним порошком. Показано, що процес відбувається в основному на стадії ванни й основною причиною їхнього утворення є водень.

Введення феросиліцію до складу покриття помітно підвищує продуктивність наплавлення, але при цьому значно підвищується схильність до утворення пор. Введення 5 % гематиту дозволило зняти проблему утворення пор.

Хімічний аналіз складу й випробування механічних властивостей наплавленого металу показують, що при використанні залізного порошку електроди перебувають на рівні вимог до типу Э46 за ГОСТ 9467. Виключено утворення пор і гарячих тріщин.

Розроблені рутилові електроди із залізним порошком на базі мінеральної сировини України, що володіють підвищеними зварювально-технологічними властивостями й коефіцієнтом наплавлення 16-18 г/Агод.

Ключові слова: електрод, залізний порошок, зварювання, продуктивність, пори, рутил, тріщини.

Ізотова Е.А. «Повышение производительности рутиловых электродов».

Целью разработки является повышение производительности и сварочно-технологических свойств рутиловых электродов 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.

Исследован механизм процесса образования газовых полостей при многослойной наплавке высокопроизводительными электродами с железным порошком.

Показано, что процесс происходит в основном на стадии ванны и основной причиной их образования является водород.

Введение ферросилиция в состав покрытия заметно увеличивает производительность наплавки, но при этом значительно повышается склонность к образованию пор. Введение 5% гематита позволило снять проблему образования пор.

Химический анализ состава и испытания механических свойств наплавленного металла показывают, что при использовании железного порошка электроды находятся на уровне требований к типу Э46 по ГОСТ 9467.

Исключено образования пор и горячих трещин.

Разработанные рутиловые электроды с железным порошком на базе минерального сырья Украины, обладающих повышенными сварочно-технологическими свойствами и коэффициентом наплавки 16-18 г/Ач.

Ключевые слова: электрод, железный порошок, сварка, производительность, время, рутил, трещины.

Izotova E. «Improving the performance of rutile electrodes»

The aim of the development is to increase the productivity and welding and technological properties of rutile electrodes through the use of iron powder as a cheap and effective filler in fusion welding.

A methodology for calculating performance indicators has been developed, it allows determining 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.

The mechanism of the process of formation of gas cavities during multilayer surfacing with high-performance electrodes with iron powder is investigated. It was shown that the process occurs mainly at the stage of the bath and the main reason for their formation is hydrogen.

The introduction of ferrosilicon in the coating composition significantly increases the productivity of surfacing, but it significantly increases the tendency to form pores. The introduction of 5% hematite allowed to remove the problem of pore formation.

Chemical analysis of the composition and testing of the mechanical properties of the deposited metal show that when using iron powder, the electrodes are at the level of requirements for type E46 according to GOST 9467. The formation of pores and hot cracks is excluded.

Developed rutile electrodes with iron powder based on mineral raw materials of Ukraine, which have improved welding and technological properties and a deposit coefficient of 16-18 g / Ah.

Keywords: electrode, iron powder, welding, productivity, time, rutile, cracks.

Постановка проблеми

В останні роки в Україні й за кордоном широко застосовуються електроди із залізним порошком у покритті, що забезпечують підвищену продуктивність ручного дугового зварювання [1]. Завдяки наявності залізного порошку в покритті й ретельно підбраному складу покриття подібні електроди мають досить гарні зварювально-технологічні властивості. Таким чином, широке застосування електродів з високим коефіцієнтом наплавлення відкриває більші можливості підвищення продуктивності ручного дугового зварювання.

Актуальним є задача розробити рутилові електроди із залізним порошком на базі мінеральної сировини України, що володіють підвищеними зварювально-технологічними властивостями й коефіцієнтом наплавлення 16-18 г/Агод.

Аналіз останніх досліджень

У теперішній час приділяється велика увага створенню електродів із залізним порошком у покритті [2-4]. Основою для розробки електродів з підвищеною продуктивністю служили відомі покриття ОММ-5, ЦМ-7, МР-3, АНО-4, УОНИ-13 і ін.

Слід зазначити, що до високопродуктивних електродів із залізним порошком виявили значний інтерес і закордоном [5, 6].

У найближчі роки в нашій країні намічається збільшення виробництва залізного порошку для потреб електродного виробництва. Якщо прийняти, що продуктивність праці при зварюванні електродом із залізним порошком підвищиться в порівнянні зі звичайними еле-

ктродами на 30-35 %, то, як показали розрахунки, економія тільки заробітної плати складе близько 500 тис. грн. у рік.

Однак економічні переваги високопродуктивних електродів цим не вичерпуються. Електроди із залізним порошком і великою товщиною покриття відрізняються досить малими втратами металу на розбризкування при зварюванні. Наприклад, завдяки незначному розбризкуванню й гарній віддільності шлаків, полегшенню праці при очищенні швів від бризів і шлаків, вартість зварених резервуарів знижується приблизно на 12 %.

Постановка завдання досліджень

Метою даної роботи є розробка нових високопродуктивних електродів типу Э46 на базі мінеральної сировини України для зварювання відповідальних конструкцій з вуглецевих сталей на змінному й постійному струмі, що забезпечують коефіцієнт наплавлення не менш 16 г/Агод. за рахунок використання залізного порошку в якості дешевого й ефективного наповнювача при зварюванні плавленням.

Експериментальна частина

Для досліджень використовувалися металеві електроди для ручного дугового зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей, що виготовляються способом обпресування. Для виготовлення дослідних партій використовували прес промислового виготовлення (рис.1). Стрижні електродів виготовляли зі сталевого зварювального дроту марки Св-08А за ГОСТ 2246 діаметром 5 і 6 мм. Застосовувалося покриття електродів рутилового виду, основу якого становить мінерал – рутит TiO_2 , використовуваний у вигляді рутилового концентрату по ТУ 4-267-73.

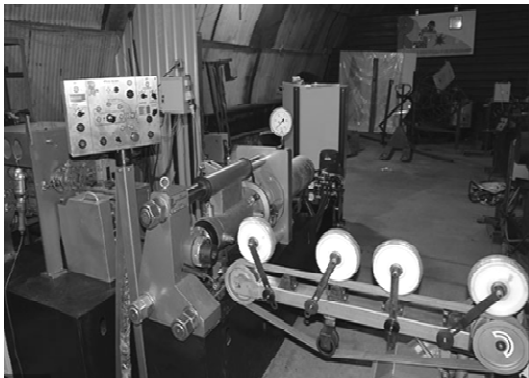


Рис.1 – Прес для виготовлення електродів

У якості розкислювача металу шва застосовувався феромарганець марки ФМн 1,0 за ГОСТ 4755 і феросиліцій марки Си-45 за ГОСТ 1415. Як наповнювач використовували залізний порошок марки ПЖ1 за ГОСТ 9849. 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 робили за допомогою приладу БИА-100. Виготовляли варіанти електродів з 50 % залізного порошку й системою покриття рутит-польовий шпат (табл.1).

Таблиця 1 - Склад покриттів дослідних електродів із залізним порошком в %

Найменування компонентів	Варіанти складу покриття		
	1	2	3
Рутит	12	19	34
Польовий шпат	34	27	12
Феросиліцій	4	4	4
Залізний порошок	50	50	50

Результати досліджень

При вивченні різних металургійних систем було встановлено, що продуктивність розплавлення електрода в значній мірі залежить від співвідношення основних компонентів у покритті. Було визначено, що наявність у покриттях однойменних компонентів, але взятих у різних співвідношеннях, не визначає однакові зварювально-технологічні властивості електродів (табл. 2).

Наявність залізного порошку в покритті обумовило деякі зміни загальноприйнятої методики визначення характеристик плавлення електродів. Тому при вивченні електродів із залізним порошком користувалися трохи зміненою методикою. Замість одного коефіцієнта розплавлення уведено два коефіцієнти розплавлення стрижня α_{pc} і коефіцієнт розплавлення електрода α_{pz} .

Таблиця 2 - Продуктивність розплавлення дослідних електродів із залізним порошком

Варіант електрода	Коефіцієнт маси покриття в %	Коефіцієнт наплавлення в г/Агод	Продуктивність розплавлення електрода в г/год
1	180	13,2	3660
2	180	17,1	5030
3	180	18,4	5320

Наявність залізного порошку в покритті обумовило деякі зміни загальноприйнятої методики визначення характеристик плавлення електродів. Тому при вивченні електродів із залізним порошком користувалися трохи зміненою методикою. Замість одного коефіцієнта розплавлення уведено два коефіцієнти розплавлення стрижня α_{pc} і коефіцієнт розплавлення електрода α_{pz} . Коефіцієнт розплавлення стрижня визначається як коефіцієнт розплавлення електродів, покриття яких не містить залізного порошку:

$$\alpha_{pz} = \frac{G_c}{It} z / Aч, \quad (1)$$

де G_c – вага розплавленого стрижня в г; I – сила зварювального струму в А; t – час горіння дуги в год.

Коефіцієнт розплавлення електрода, що враховує вагу розплавленого порошку при плавленні електрода, визначається по формулі:

$$\alpha_{pz} = \frac{G_c + g_{ж.п}}{It} z / Aч, \quad (2)$$

де $g_{ж.п}$ – вага залізного порошку в розплавленій частині покриття в г.

Коефіцієнт втрат розраховується по формулі:

$$j = \frac{G_n}{G_c + g_{ж.п}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де G_n – вага наплавленого металу в г.

Продуктивність розплавлення електрода із залізним порошком у покритті визначається по формулі:

$$g_p = \alpha_{p\gamma} z/A\gamma, \quad (4)$$

У результаті серії експериментів був розроблений оптимальний варіант електрода, склад покриття й механічні властивості якого представлені в табл.3. Хімічний склад наплавленого металу в %: 0,09-0,12 C; 0, 62-0,80 Mn; 0, 28-0,40 Si; 0,025-0,031 S; 0,023-0,030 P.

Дані електроди мають наступні характеристики: коефіцієнт маси покриття дорівнює 140%, коефіцієнт розплавлення 18 г/Агод, коефіцієнт наплавлення 17, 8 г/Агод, коефіцієнт втрат 4-6 %.

Таблиця 3 - Склад покриття й механічні властивості електродів

Склад покриття в %		Механічні властивості	
Рутил	17	Межа міцності в МПа	541-546
Польовий шпат	10	Відносне подовження в %	22, 2-26,7
Залізний порошок	61	Відносне звуження в %	53, 3-67,9
Феромарганець	5	Ударна в'язкість у Дж/см ²	
Феросиліцій	4	у вихідному стані	145-175
Целюлоза	3	після штучного старіння	62-116

Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок, що характеристики плавлення електрода й механічні властивості наплавленого металу досить високі. При цьому забезпечується гарне формування зварних швів хороше відділення шлаку (рис. 2).



Рис.2 – Зовнішній вигляд зварного з'єднання

Наявність гематиту в покритті в кількості 6% дозволило повністю виключити утворення газових порожнин, незалежно від гранулометричного складу залізного порошку. Подальша перевірка електродів з гематитом у покритті дозволила встановити, що 5% гематиту досить для повного й надійного усунення газових порожнин у наплавленому металі. Випробування показали, що ці електроди мають високі зварювально-технологічні властивості й високі показники продуктивності - коефіцієнт наплавлення у межах 14-16 г/Агод.

По механічних властивостях електроди задовольняють вимогам, пропонованим до типу електродів Э46 за ГОСТ 9467.

Викладені результати експериментів дозволили встановити наступне. Для придушення реакцій, що ведуть до утворення газових порожнин, потрібно гематиту менше 5 %, якщо використовується більше окислений залізний порошок. Якщо покриття містить феросиліцій, що підвищує коефіцієнт наплавлення, те, щоб виключити утворення газових порожнин, потрібно вводити в покриття більше 5 % гематиту.

Висновки

Практично підтверджена залежність продуктивності наплавлення від вмісту рутилу, польового шпату й FeMn. Використовуючи розрахунковий метод можна визначити продуктивність наплавлення електродів із залізним порошком у покритті конкретного складу

Результати аналізу хімічного складу й механічних випробувань наплавленого металу показують, що при використанні залізного порошку й вмісті вуглецю в металі шва не вище 0,13 %, механічні властивості перебувають на рівні вимог до електродів типу Э46 за ГОСТ 9467.

Розроблені рутилові електроди із залізним порошком і рудо-мінеральною сировиною України, володіють підвищеним до 16-18г/Агод коефіцієнтом наплавлення й поліпшеними зварювально-технологічними властивостями.

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 Международной конференции 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, Коляда Г.Е., Явдошин И.Р. [и др.] // 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 Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ. – Краснодар, 22-26 июня 1998 г. – М., 1998. – С. 135-137.
5. Farias J.P. The effect of magnesium content on the arc stability of SMAW E7016-C2L/8016-C2 covered Electrodes / J. P. Farias, A. M. Quites, E. Surian // Welding Journal. – 1997. – no 5. – Pp. 124-250.
6. Jariyabon M, Davenport AJ, Ambert R, Connolly BJ, Willians SW, Price DA (2007). The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024 – T351. Corrosion Sci., 49: 877-909.

References

1. Ignatchenko, VP & Bugaj, AI 1998, 'Sostojanie i tendencii razvitija proizvodstva svarocnyh materialov v stranah SNG', Sbornik dokladov 1-oj 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 okslennosti 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 ilmenitovyje jelektrody, Roteks, Moskva.
4. Javdosshin, IR 1998, 'Novye jelektrody IJeS im. E.O. Patona dlja svarki konstrukcij iz nizkouglerodistyh i nizkolegirovannyh stalej', Sbornik dokladov 1-oj Mezhdunarodnoj konferencii po svarocnym materialam stran SNG, Moskva, pp. 135-137.
5. Farias, JP, Quites, AM & Surian, E 1997, 'The effect of magnesium content on the arc stability of SMAW E7016-C2L/8016-C2 covered Electrodes', Welding Research Supplement, Welding Journal, no. 5, pp. 124-250.
6. Jariyabon M, Davenport AJ, Ambert R, Connolly BJ, Willians SW, Price DA (2007). The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024 – T351. Corrosion Sci., 49: 877-909.

Стаття надійшла до редакції 17 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-80-85
УДК 621.791

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ГАЗОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ЧАВУНУ

©Калін М. А.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Калін Микола Андрійович: ORCID: 0000-0002-4068-2718; svargof@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні та зварювального виробництва; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Метою дослідження є створення прутка для газового зварювання чавунних деталей, з покращеними механічними характеристиками і меншою твердістю металу шва.

Недоліком відомих зварювальних прутків є висока твердість і низькі механічні властивості металу шва. Це не дозволяє використовувати згадані присадкові прутки для зварювання відповідальних конструкцій і наплавлення деталей, що підлягають механічній обробці в промислових об'ємах.

У якості присадкового матеріалу при газовому й електродуговому зварюванні чавуну, використовували прутки діаметром 8-10 мм із чавуну марки А або Б за ГОСТ 2671-80. Як флюс при газовому зварюванні використовували буру технічну за ГОСТ 8429-77, прожарену при температурі 300-350° С протягом 2 -х годин.

В якості легуючої добавки РЗМ у чавунних прутках використовували ітрій і ербій.

Перевірку зварювально-технологічних властивостей дослідних складів прутків проводили при газовому (ацетилено-кисневому) і електродуговому зварюванню високоомічного чавуну марки ВЧ 40.

На підставі проведених випробувань зварювально-технологічних властивостей дослідних прутків визначено, що оптимальним є пруток №2, що забезпечує гарну змочуваність зварювальної ванни рідким металом. Шлаки легкоплавкі й не утрудняють ведення процесу зварювання розробок великого обсягу. Дефектів зварених швів немає.

Структура наплавленого металу у поверхні шва на глибині до 1,5-2 мм перлітна з невеликими ділянками аустеніту дендритної орієнтації. Далі по висоті шва аж до лінії сплаву в структурі переважає перліт. Включення фериту і цементиту одиничні. Графіт кулястий середньої величини, декілька дрібніше, ніж в основному металі.

Твердість в цій зоні складає 220-229 НВ і дозволяє легко проводити механічну обробку зварних швів звичайним металоріжучим інструментом.

Ключові слова: прутки, чавун, зварювання, твердість, тріщини.

Калин Н.А. «Усовершенствование материалов для газовой сварки чугуна».

Целью исследования является создание прутка для газовой сварки чугуновых деталей, с улучшенными механическими характеристиками и меньшей твердостью металла шва.

Недостатком известных сварочных прутков является высокая твердость и низкие механические свойства металла шва. Это не позволяет использовать упомянутые присадочные прутки для сварки ответственных конструкций и наплавки деталей, подлежащих механической обработке в промышленных объемах.

В качестве присадочного материала при газовой и электродуговой сварке чугуна, использовали прутки диаметром 8-10 мм из чугуна марки А или Б по ГОСТ 2671-80. В качестве флюса при газовой сварке использовали буру техническую по ГОСТ 8429-77, прокаленную при температуре 300-350°С в течение 2-х часов.

В качестве легирующей добавки РЗМ в чугунных прутках использовали иттрий и эрбий.

Проверку сварочно-технологических свойств исследуемых составов прутков проводили при газовой (ацетилено-кислородной) и электродуговой сварке высокопрочного чугуна марки ВЧ 40.

На основании проведенных испытаний сварочно-технологических свойств исследуемых прутков определено, что оптимальным является пруток №2, что обеспечивает хорошую смачиваемость сварочной ванны жидким металлом. Шлаки легкоплавкие и не затрудняют ведение процесса сварки разделок большого объема. Дефектов сварных швов нет.

Структура наплавленного металла на поверхности шва на глубине до 1,5-2 мм перлитная с небольшими участками аустенита дендритной ориентации. Далее по высоте шва до линии сплавления в структуре преобладает перлит. Включение феррита и цементита единичны. Графит шаровидный средней величины, несколько мельче, чем в основном металле.

Твердость в этой зоне составляет 220-229 HB и позволяет легко проводить механическую обработку сварных швов обычным металлорежущим инструментом.

Ключевые слова: пруток, чугун, сварка, твердость, трещины.

Kalin N. «Improvement of materials for gas welding of cast iron».

The aim of the study is to create a bar for gas welding of cast iron parts, with improved mechanical characteristics and lower hardness of the weld metal.

A disadvantage of the known welding rods is the high hardness and low mechanical properties of the weld metal. This does not allow the use of the mentioned filler rods for welding critical structures and surfacing of parts to be machined in industrial volumes.

As a filler material in gas and electric arc welding of cast iron, rods with a diameter of 8-10 mm from cast iron of grade A or B according to GOST 2671-80 were used. As a flux in gas welding, we used a technical drill according to GOST 8429-77, calcined at a temperature of 300-350 ° C for 2 hours.

Yttrium and erbium were used as an alloying and rare-earth metals additives in iron bars.

The welding-technological properties of the investigated rod compositions were checked during gas (acetylene-oxygen) and electric arc welding of high-strength cast iron of grade VCh 40.

Based on the tests of the welding and technological properties of the rods under study, it was determined that rod No. 2 is optimal, which ensures good wettability of the weld pool with molten metal. Slags are fusible and do not impede the conduct of the welding process for cutting large volumes. No weld defects.

The structure of the deposited metal on the surface of the weld at a depth of 1.5-2 mm is pearlitic with small areas of austenite of dendritic orientation. Further along the height of the weld to the fusion line, perlite prevails in the structure. The inclusion of ferrite and cementite are single. Spherical graphite of medium size, slightly smaller than in the base metal.

The hardness in this zone is 220-229 HB and allows easy machining of welds with conventional metal cutting tools.

Keywords: bar, cast iron, welding, hardness, cracks.

Постановка проблеми

Чавун широко застосовується як конструкційний матеріал, що відрізняється хорошими ливарними властивостями і малим коефіцієнтом лінійного розширення, має високу зносостійкість і оброблюваність.

У чавунних виливках на різних стадіях обробки виявляються різні дефекти. Крім того, знижена міцність і висока крихкість чавунів призводять в окремих випадках до поломки в процесі експлуатації виготовлених з них деталей, а це в свою чергу призводить до виходу з ладу або простою обладнання [1]

Метою дослідження є створення присадкового прутка для газового зварювання чавунних деталей, з покращеними механічними характеристиками і меншою твердістю металу

шва, що забезпечуються за рахунок зміни системи розкислення і легування металу шва компонентами прутка.

Аналіз останніх досліджень

Високоміцні магнієві чавуни при однакових умовах мають дещо кращу рідкотекучість, ніж сірі чавуни. Завдяки цьому створюються хороші передумови для отримання щільного, без пор і шлакових включень, наплавленого металу. Однак значна схильність магнієвого чавуну до утворення усадочних раковин створює додаткові труднощі при його зварюванні [1,2,3]. Останнім часом намітилася тенденція використання рідкоземельних елементів (РЗМ) [4]. При зварюванні чавуну утворюється зона зниженої пластичності, що значно ускладнює процес зварювання. При зварюванні високоміцного чавуну отримати зварні з'єднання, по міцності і пластичності близькі до основного металу, значно важче, ніж при зварюванні сірого чавуну, тим більше, що магній, що вводиться в чавун, збільшує його схильність до утворення структур відбілу.

Недоліком відомих зварювальних прутків [5] є висока твердість і низькі механічні властивості металу шва. Це не дозволяє використовувати згадані присадкові прутки для зварювання відповідальних конструкцій і наплавлення деталей, що підлягають механічній обробці в промислових об'єктах.

Основними причинами, по яким неможливо отримати якісний метал шва при зварюванні і наплавленні чавунних деталей в промислових умовах є недосконала система розкислення і легування його присадковим прутком [6]. Метал шва має підвищену твердість низькі механічні властивості, що обумовлює схильність до утворення мілких тріщин, які знижують експлуатаційну стійкість зварних і наплавлених деталей.

Експериментальна частина

Чавунні прутки за ГОСТ 2671-80 для газового зварювання являють собою чавун евтектичного й заевтектоїдного складу з вуглецевим еквівалентом 4,3 - 4,8 %. Введення рідкоземельних металів до складу зварювального прутка дозволяє одержати наплавлений метал з кулястою (глобулярною) формою графіту. Прутки різних діаметрів відливали в графітові кокілі. Метал для прутків виплавляли в індукційних печах, що забезпечують високу температуру перегріву (1400-1580° С) з регулюванням витримки металу в рідкому стані не менш 10-15 хв. Хімічний склад трьох варіантів отриманих прутків наведений у табл. 1.

Для порівняння, у якості присадкового матеріалу при газовому зварюванні чавуну, використовувалися прутки діаметром 8-10 мм із чавуну марки А за ГОСТ 2671-80. Як флюс при газовому зварюванні використовували буру технічну за ГОСТ 8429-77, прожарену при температурі 300-350° С протягом 2 -х годин. В якості легуючої й добавки РЗМ у чавунних прутках використовували ітрій і ербій.

Перевірку зварювально-технологічних властивостей дослідних складів прутків проводили при газовому зварюванні високоміцного чавуну марки ВЧ 40. Імітацію дефектів робили шляхом строжки канавок на поверхні чавунних пластин товщиною 30 мм. Твердість металу шва й наплавленого металу вимірювали на приладі ТК-2, мікротвердість заміряли на приладі ПМТ-3. Проби для хімічного аналізу наплавленого металу відбирали з верхніх шарів наплавлення. Загальний характер мікроструктури зварених швів оцінювали за допомогою оптичного мікроскопа МІМ –8М на поперечних мікрошліфах розміром 15x25x30 мм, протравлених в 5 %-ному спиртовому розчині азотної кислоти.

Таблиця 1-Хімічний склад дослідних прутків в %

Варіант прутка	Зварювально-технологічні властивості
А	Недостатня змочуваність рідким металом поверхні основного металу. Поганий захист зварювальної ванни, підвищена тугоплавкість. Є зашлаковки металу шва.
1	Змочуваність зварювальної ванни рідким металом задовільна. Утворюються легкоплавкі шлаки. Зашлаковок і несплавов немає.
2	Змочуваність зварювальної ванни рідким металом гарна. Шлаки легкоплавкі й не утрудняють ведення процесу зварювання розробок великого обсягу. Дефектів зварених швів немає.
3	Змочуваність зварювальної ванни гарна. Спостерігається кипіння рідкого металу, утворюються пори в наплавленому металі. Шлаки занадто рідкотекучі і погано вкривають метал шва.

Результати досліджень

Для забезпечення структури чавуну із глобулярним графітом у пропонований склад прутка уведено рідкоземельні метали в кількості 0,03-0,5%. Перебуваючи в наплавленому металі разом з магнієм, РЗМ забезпечує глобулярну форму графіту.

Використання одночасно двох ефективних модифікаторів - магнію й РЗМ дозволило одержати повністю кулястий графіт при меншому вмісті цих модифікаторів у складі прутків, чим при роздільному їхньому застосуванні. Це пояснюється тим, що дія модифікаторів, як правило, підсумовується. Крім того, РЗМ придушують дію таких шкідливих елементів як вісмут, свинець, сурма, титан, миш'як, олово присутніх у вигляді домішки в чавунах, відновлюючи тим самим кулясту форму графіту, а також сприяють очищенню металу від сірки й газів, подрібнюють зерно, підвищують механічні властивості зварного з'єднання.

Результати випробування зварювально-технологічних властивостей і якості наплавленого металу при газовому зварюванні високоміцного чавуну із застосуванням прутків марки А і дослідних варіантів прутків наведені в табл. 2.

Таблиця 2 - Результати випробування зварювальних прутків

Варіант прутка	Зварювально-технологічні властивості
А	Недостатня змочуваність рідким металом поверхні основного металу. Поганий захист зварювальної ванни, підвищена тугоплавкість. Є зашлаковки металу шва.
1	Змочуваність зварювальної ванни рідким металом задовільна. Утворюються легкоплавкі шлаки. Зашлаковок і несплавов немає.
2	Змочуваність зварювальної ванни рідким металом гарна. Шлаки легкоплавкі й не утрудняють ведення процесу зварювання розробок великого обсягу. Дефектів зварених швів немає.
3	Змочуваність зварювальної ванни гарна. Спостерігається кипіння рідкого металу, утворюються пори в наплавленому металі. Шлаки занадто рідкотекучі і погано вкривають метал шва.

На підставі проведених випробувань зварювально-технологічних властивостей дослідних прутків визначено, що оптимальним є пруток варіанта № 2. Для металографічного дослідження якості наплавленого металу й зон термічного впливу були використані зразки, заварені газовим зварюванням із застосуванням прутка варіанта № 2 і прутка марки А. Метало-

графічними дослідженнями встановлено що по макроструктурі на обох зразках чітко проявляється наплавлений метал висотою 8-9 мм і зони термічного впливу шириною до 10 мм, чіткої лінії сплавки основного й наплавленого металу немає (рис. 1). Структура основного металу (рис. 2) в обох випадках складається з перліту, кулястого графіту середніх розмірів і одиничних досить дрібних включень цементиту. Ферит є присутнім у невеликій кількості (до 5 %). Твердість основного металу становить 210-217 од НВ.

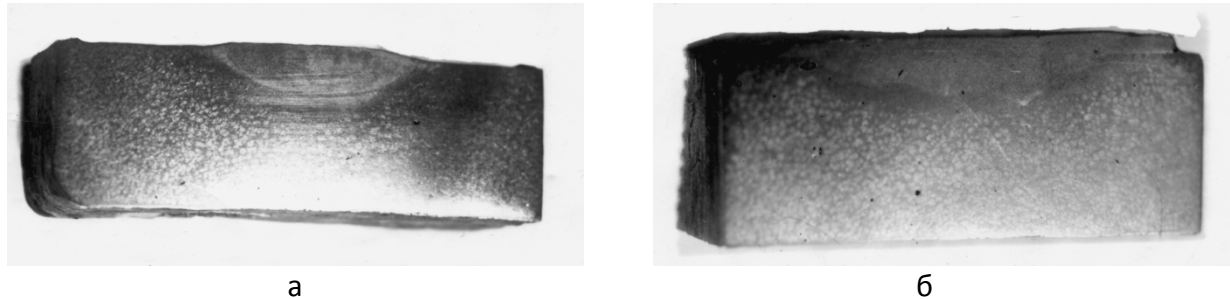


Рис. 1 - Макроструктура шва при зварюванні серійним (а) і дослідним прутком (б)

Структура наплавленого металу в поверхні шва на глибині до 1,5-2 мм перлітна й невеликими ділянками аустеніту дендритної орієнтації. Далі по висоті шва аж до лінії сплавки в структурі переважає перліт.

Твердість у цій зоні в обох випадках становить 220-229 од. НВ. Включення фериту й цементиту одиничні. Графіт кулястий середньої величини, трохи дрібніше, ніж в основному металі. У зоні термічного впливу на обох зразках відзначається значне збільшення кількості фериту в порівнянні з основним металом. Твердість у зоні термічного впливу обох зразків становить 170-198 од. НВ.

Добавки РЗМ утворюють додаткові центри кристалізації графіту, що у свою чергу, знижує ймовірність утворення гартівних структур у зоні сплавки. Крім того, РЗМ, що володіють більшою спорідненістю до кисню і сірки, сприяють очищенню границь зерен перлітної матриці за рахунок утворення оксидів і оксисульфідів РЗМ і, як наслідок, підвищується стійкість наплавленого металу й перехідної зони проти утворення тріщин і пор.

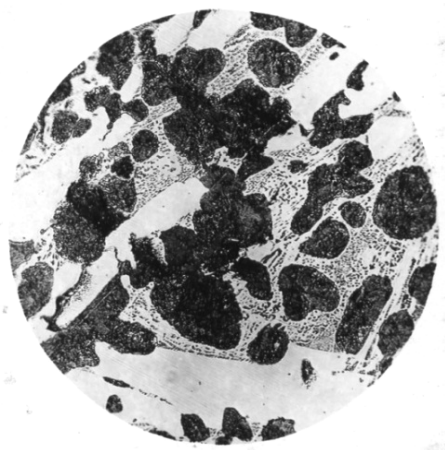


Рис. 2 - Мікроструктура основного металу (х 250)

Газове зварювання зразків з високоміцного чавуну здійснювали зварювальним пальником з наконечником №5 і підігрівом до 600-750° С. Результати випробування механічних властивостей при випробуваннях на розрив і вигин, а також твердість наплавленого металу й перехідної зони наведені в табл. 2, 3, а вигляд зварених деталей показано на рис. 3. Після закінчення зварювання наплавлений метал перевіряється зовнішнім оглядом. При цьому повинні бути відсутні пори, раковини, шлакові включення, подрізи, прожоги, тріщини в наплавленому металі й перехідній зоні.

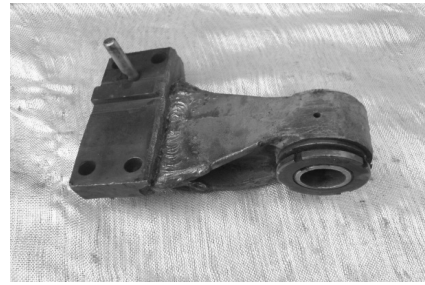


Рис. 3 – Вигляд чавунних деталей після зварювання

Таблиця 2 – Механічні властивості зварених з'єднань

Матеріал зразка	Межа міцності при розриві, МПа	Границя текучості, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²
ВЧ 40	409-412	263-306	12, 7-195	18-26
Метал шва	496-512	213-291	29, 7-30,5	38-42

Таблиця 3 – Твердість металу звареного з'єднання.

Матеріал зразка	Твердість, НВ	
	наплавленого металу	перехідної зони
ВЧ 40	170-180	190-200
Метал шва	170-180	180-200

Висновки

Розроблений склад прутка для газового зварювання чавуну, що містить нову систему легування і розкислення. Структура наплавленого металу у поверхні шва на глибині до 1,5-2 мм перлітна з невеликими ділянками аустеніту дендритної орієнтації. Твердість в цій зоні складає 220-229 НВ. Графіт кулястий середньої величини, декілька дрібніше, ніж в основному металі. Змочуваність зварювальної ванни рідким металом гарна. Шлаки легкоплавкі. Дефектів зварених швів немає.

Список використаних джерел:

1. Иванов Б. Г. Сварка и резка чугуна / Б. Г. Иванов, Ю. И. Журавичский, В. И. Левченков. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Левченков В. И. Состояние и перспективы развития сварки чугуна (обзор) / В. И. Левченков // Сварочное производство. – 1988. – № 2. – С. 2-4.
3. Метлицкий В. А. Сварка чугунных труб (обзор) / В. А. Метлицкий // Автомат, сварка. – 1998. – № 1. – С. 27-33.
4. Кононенко В. Я. Газовая сварка и резка / В. Я. Кононенко. – Киев : Экотехнология, 2005. – 208 с.
5. Cottrell C.L.M. Welding cast irons / C.L.M. Cottrell. – Cambridge : Abington, 1985. – 22 p.
6. Comparing the Structure and Mechanical Properties of Welds on Ductile Cast Iron (700 MPa) under Different Heat Treatment Conditions / R. M. Gouveia, F. J. Silva, O.C. Paiva [et al.] // Metals. – 2018. – Vol. 8.

References

1. Ivanov, BG, Zhuravickij, JuI & Levchenkov, VI 1977, Svarka i rezka chuguna, Mashinostroenie, Moskva.
2. Levchenkov, VI 1988, 'Sostojanie i perspektivy razvitija svarki chuguna (obzor)', Svarochnoe proizvodstvo, no. 2, pp. 2-4.
3. Metlickij, VA 1998, 'Svarka chugunnyh trub (obzor)', Avtomat, svarka, no. 1, pp. 27-33.
4. Kononenko, VJa 2005, Gazovaja svarka i rezka, Jekotehnologija, Kiev.
5. Cottrell, CLM 1985, Welding cast irons, Abington, Cambridge.
6. Gouveia, RM, Silva, FJ, Paiva, OC et al. 2018, 'Comparing the Structure and Mechanical Properties of Welds on Ductile Cast Iron (700 MPa) under Different Heat Treatment Conditions', Metals, vol. 8, pp.

Стаття надійшла до редакції 18 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-86-91

УДК 658.562:621

ПРО ІНТЕРВАЛИ ЯКОСТІ ПРИ ОЦІНЦІ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ ЗА ПАРАМЕТРОМ ТОЧНОСТІ ЛІНІЙНОГО РОЗМІРУ

©Ламнауер Н.Ю.¹, Пташний О.Д.², Бобрицька Г.С.²

*Українська інженерно-педагогічна академія¹
Харківський національний автомобільно-дорожній університет²*

Інформація про авторів:

Ламнауер Наталія Юріївна: ORCID: 0000-0002-6779-8761; lamnaouernatali@gmail.com; доктор технічних наук; професор кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженернопедагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна

Пташний Олег Дмитрович: ORCID: 0000-0001-6123-7253; olegptashniy@gmail.com; кандидат педагогічних наук; доцент кафедри вищої математики; Харківський національний автомобільно-дорожній університет; вул. Я. Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна

Бобрицька Галина Сергіївна: ORCID: 0000-0003-2793-5108; bogalina31@ukr.net; кандидат педагогічних наук; доцент кафедри вищої математики; Харківський національний автомобільно-дорожній університет; вул. Я. Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна

Серед питань забезпечення якості продукції важливою складовою є оцінка якості технологій її виготовлення. Якість технології оцінюється за якістю отриманих виробів. Одним з показників якості виробів машинобудування є лінійний розмір деталей. Будь-який виріб може бути виготовлено з допомогою різних технологій, але кожна з них забезпечує й не однакову якість. Висока якість супроводжується збільшенням витрат, що в умовах конкуренції на ринку є не завжди придатним для виробників продукції.

В залежності від потреб виробника щодо якості, стає необхідним визначити технологію, що забезпечує бажану якість. Розглянуті питання створення інструменту оцінки якості виготовлення деталей за точністю розмірів з метою визначення градації якості технологій. Для цього пропонується впровадження оцінки технологій з інтервалами якості.

В дослідженнях використано теоретичний апарат теорії ймовірностей та математичної статистики. Запропоновано використання загальної моделі розподілу лінійних розмірів деталей та знайдених оцінок її параметрів. Показано, що запропонована модель має три різні форми щільності розподілу при однаковому теоретичному розмаху оцінок верхнього та нижнього значення розмірів та при однакової кількості проведених вимірів. Ці форми можуть ідентифікувати якість технологій, як високу, середню та низьку.

На базі отриманих розрахунків будується система градації, що визначає при заданому об'ємі вимірювань якісну характеристику технології виготовлення виробів. Використання запропонованих результатів дає можливість аналізувати якість процесу виготовлення виробів зі зростанням їхнього об'єму. Отримані результати дозволяють знайти оцінку доцільної кількості виготовлення виробів з бажаною якістю. Проведені дослідження допомагають у вирішенні питання управління якістю продукції машинобудування.

Ключові слова: якість, точність, лінійний розмір, деталь, технологія виготовлення.

Ламнауер Н.Ю., Пташний О.Д., Бобрицкая Г.С. «Об интервалах качества при оценке технологий изготовления изделий по параметру точности линейного размера

Среди вопросов обеспечения качества продукции важной составляющей является оценка качества технологии ее изготовления. Качество технологии оценивается по качеству полученных изделий. Одним из показателей качества изделий машиностроения является линейный размер деталей. Любое изделие может быть произведено при помощи различных технологий, но каждая из них обеспечивает и не одинаковое качество. Высокое качество со-

проводятся увеличением затрат, что в условиях конкуренции на рынке не всегда приемлемо для производителей продукции.

В зависимости от потребностей производителя, касающихся качества, появляется необходимость определить технологию, которая обеспечивает желательное качество. Рассмотрены вопросы создания инструмента оценки качества изготовления деталей по точности размеров с целью определения градации качества технологий. Для этого предлагается внедрение оценки технологий с интервалами качества.

В исследованиях использован теоретический аппарат теории вероятностей и математической статистики. Предложено использование общей модели распределения линейных размеров деталей и найденных оценок ее параметров. Показано, что предложенная модель имеет три различные формы плотности распределения при одинаковом теоретическом размахе оценок верхнего и нижнего значения размеров и при одинаковом количестве проведенных измерений. Эти формы могут идентифицировать качество технологий, как высокое, среднее и низкое.

На основе полученных расчетов строится система градации, которая определяет при заданном объеме измерений качественную характеристику технологии изготовления изделий. Использование предложенных результатов дает возможность анализировать качество процесса изготовления изделий с ростом их объема. Полученные результаты позволяют найти оценку целесообразного количества изготовления изделий с желаемым качеством. Проведенные исследования помогают в решении вопросов управления качеством продукции машиностроения.

Ключевые слова: качество, точность, линейный размер, деталь, технология изготовления.

Lamnauer N., Ptashnyi O., Bobrytska H. «About quality intervals in assessing the manufacturing technology of products by the accuracy parameter of linear size»

Among the issues of ensuring product quality, an important component is the assessment of the quality of its manufacturing technology.

The quality of technology is assessed by the quality of the products received. One of the indicators of the quality of engineering products is the linear size of the parts. Any product can be produced using various technologies, but each of them provides not the same quality. High quality is accompanied by increased costs, which in a competitive market is not always acceptable for manufacturers.

Depending on the needs of the manufacturer regarding quality, it becomes necessary to identify a technology that provides the desired quality. The issues of creating a tool for assessing the quality of manufacturing parts by the accuracy of size to determine the gradation of the quality of technology are considered. It is proposed to introduce assessment of technology with intervals of quality.

The research used the theoretical apparatus of probability theory and mathematical statistics. The use of a general model of the distribution of the linear dimensions of parts and the found estimates of its parameters is proposed.

It is shown that the proposed model has three different forms of distribution density with the same theoretical range of estimates of the upper and lower sizes and with the same number of measurements. These forms can identify the quality of technology as high, medium, and low.

Based on the calculations obtained, a gradation system is constructed that determines, for a given volume of measurements, a qualitative characteristic of the technology for manufacturing products.

Using the proposed results makes it possible to analyze the quality of the manufacturing process of products with an increase in their volume. The results obtained allow us to find an estimate of the appropriate amount of manufacturing products with the desired quality. The conducted studies help in resolving issues of quality management of engineering products.

Keywords: quality, accuracy, linear size, machine part, manufacturing technology.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями

Промислове виробництво є флагманом економіки будь-якої держави. Галузь машинобудування є основою промисловості. Розвиток промисловості не можливий без забезпечення якості продукції. Забезпечення якості в свою чергу супроводжується технологією виготовлення, для якої застосовуються інструменти її оцінки. Оцінка якості технологій проводиться на основі аналізу якості отриманих виробів. Одним з показників якості виробів деталей є точність лінійного розміру. Забезпечити необхідну точність можливо за допомогою різних технологій та різного обладнання. Стає необхідним оцінити та обрати ту технологію виготовлення, що є економічно доцільною у відповідності з бажаною якістю. Для цього має сенс проводити градацію якості технологій.. Питання оцінки якості насамперед вирішуються за допомогою ймовірно-статистичних методів управління якістю. Таким чином, використання ймовірно-статистичних моделей та оцінок їх параметрів дозволять розв'язати задачу оцінки якості технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Забезпечення якості продукції проблема, що турбує виробників у всіх країн. Отримання продукції необхідної якості є комплексним процесом. Вітчизняні та закордонні дослідники в галузі якості приділяють увагу різним аспектам у загальному комплексі заходів, щодо забезпечення якості. Дослідження по двом аспектам у взаємодії - контроль та технічне обслуговування обладнання розглянуті в [1]. Принцип побудови контрольної карти розглянуто в [8].

Контроль якості, як один з інструментів якості виграє важливу роль для моніторингу, аналізу даних для виявлення та рішення проблем виробничих процесів. Такі питання розглянуті в [2-6].

Аналіз сучасних наукових джерел в галузі якості довів, що будь-який інструмент для її досягнення повинен розглядатися в сукупності з мінімізацією витрат [7], в тому числі пов'язану доцільністю застосованої технології.

Метою роботи є запропонувати оцінку якості технологій виготовлення деталей на основі її градації та інструмент аналізу якості процесу їх виготовлення зі збільшенням кількості.

Виклад основного матеріалу

В роботі [9] пропонується розрахункова модель лінійних розмірів при виготовленні деталей машин. Ця модель має чотири параметра a - модальне значення, b - нижня межа та c - верхня межа розміру, k - параметр форми розмірів, яка визначена при $k > 0$ та $k < -1$, де $b < a < c$ та $b^3 > 0$.

Запропонована модель в [9] має значний недолік, а саме, вона не дозволяє знайти оцінки її параметрів, оскільки сучасні обчислювальні методи не можуть дати розв'язання системи чотирьох раціональних функцій з чотирма невідомими. Тому вигляд моделі не є робочим для практичного застосування. Звідси випливає, що треба видозмінити параметри даної моделі так, щоб вона стала робочою.

Для оцінки параметрів даної моделі та для того, щоб центральні моменти виражалися через теоретичний розмах $c - b$, визначимо модальне значення a через безрозмірну величину, співвідношення q ділення відрізка величиною $c - b$, де $q = (a - b) / (c - a)$.

В цьому випадку маємо $a = (b + cq) / (1 + q)$ та

$$f(x) = \begin{cases} \frac{(1+k) \frac{c}{b} - \frac{cx - b + q(x-c)}{q(b-c)} \frac{1}{b}}{c-b}, & b \leq x \leq \frac{b+qc}{1+q}; \\ \frac{(1+k) \frac{c}{b} - \frac{cx - x + q(c-x)}{b-c} \frac{1}{b}}{c-b}, & \frac{b+qc}{1+q} < x \leq c. \end{cases} \quad (1)$$

Знайдена функція розподілу для цієї моделі $F(x)$ [10], яка в точці модального значення a :

$$F(a) = \frac{q}{1+q}.$$

Математичне очікування $M(X)$ випадкової величини X з щільністю розподілу (1) має вигляд:

$$M(X) = \frac{3kb + kbq + b + bq + 3kqc + kc + c + qc}{2(1+q)(2k+1)}. \quad (2)$$

Аналіз моделі (1) показав, що вона має три різні форми щільності розподілу при однаковому теоретичному розмаху $c - b$ і при однаковій кількості n лінійних розмірів. Ця форма з увігнутими кривими, які асимптотично наближуються до моди та мають саму велику частоту появи розміру в точці налагодження розміру. Тут значення щільності розподілу в моді є необмежено велике число. Така форма кривої (1) говорить про високу якість технології виготовлення деталей за параметром лінійного розміру. Форма кривої (1) вигляду два говорить, що криві увігнуті, та в точці налагодження станка a значення щільності розподілу (1) кінцеве. Така форма кривої говорить про середню якість технології виготовлення деталей за параметром лінійного розміру. Третя форма кривої с опуклими кривими і кінцевою щільністю розподілу в моді. Це говорить про великий розкид значень лінійного розміру деталей, а значить має низьку якість технології виготовлення деталей.

Визначимо, які границі має середнє значення розмірів при кожній з цих визначених трьох якісних характеристиках технологій для моделі (1). Визначаючи параметр форми k через параметри моделі (1) і математичне очікування (2) маємо:

$$k = \frac{bq + b + cq + c - 2\bar{x} - 2\bar{x}q}{4\bar{x} + 4\bar{x}q - bq - 3b - 3cq - c}, \quad (3)$$

де $M(X)$ замінено на вибіркове середнє значення $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$,

n - об'єм вимірювань лінійних розмірів деталей.

Для розмірів виробів зі значеннями $q > 1$, розв'язуючи нерівність $k < -1$ маємо, що при заданому n технології виготовлення деталей з високою якістю мають границі середнього розміру вигляду:

$$\frac{b+cq}{1+q} < \bar{x} < \frac{b(3+q)+c(3q+1)}{4(1+q)}. \quad (4)$$

Якщо $q > 1$ і $k > 1$, то маємо середню якість технології виготовлення деталей з границями середнього розміру деталі:

$$\frac{b(3+q)+c(3q+1)}{4(1+q)} < \bar{x} < \frac{b(2+q)+c(2q+1)}{3(1+q)}. \quad (5)$$

Низька якість технології виготовлення деталей мають границі середнього розміру деталей з розв'язання нерівності $0 < k < 1$ при $q > 1$

$$\frac{b(2+q)+c(2q+1)}{3(1+q)} < \bar{x} < \frac{b+c}{2}. \quad (6)$$

Для значень $q < 1$ границі середнього розміру деталей для різних якостей технологій визначаються за формулами:

1) При високій якості технології:

$$\frac{b(3+q)+c(3q+1)}{4(1+q)} < \bar{x} < \frac{b+cq}{1+q} \quad (7)$$

2) Для середньої якості технології:

$$\frac{b(2+q)+c(2q+1)}{3(1+q)} < \bar{x} < \frac{b(3+q)+c(3q+1)}{4(1+q)} \quad (8)$$

3) Для низької якості технології:

$$\frac{b+c}{2} < \bar{x} < \frac{b(2+q)+c(2q+1)}{3(1+q)} \quad (9)$$

На Рис.1 представлено інтервали середніх значень розмірів при різних технологіях виготовлення виробів при параметрах $q = 0,5$, $b = 2$ і $c = 6$.

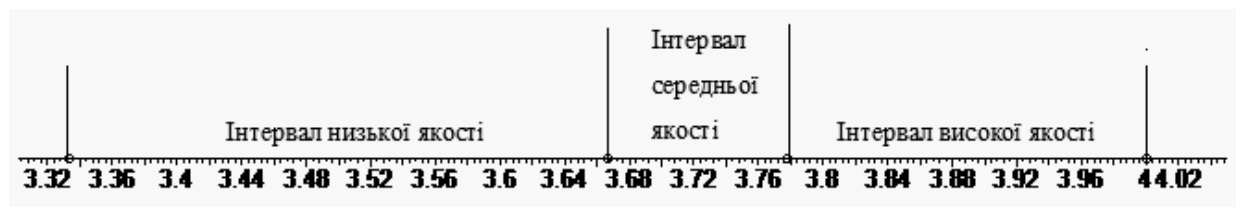


Рис. 1. – Інтервали якості технологій виготовлення деталей за параметром лінійного розміру при параметрах $q = 0,5$, $b = 2$ і $c = 6$ моделі (1)

Висновки

Отримані результати розрахункових формул (4), (5), (6), (7), (8) та (9), і методи оцінки параметрів моделі (1) в [10] дозволяють: визначити при заданому об'ємі вимірювань n якісну характеристику технології виготовлення виробів за параметром лінійного розміру, робити аналіз процесу виготовлення виробів з ростом об'єму їх виготовлення n , знайти оцінку необхідного об'єму n при виготовленні виробів у визначеному інтервалі якості.

Список використаних джерел:

1. Kurniati N. Quality inspection and maintenance: the Framework of interaction / N. Kurniati, R. HueiYeh, J. JangLin // Procedia Manufacturing. – 2015. – Vol. 4 – P. 244-251.
2. Abdullah M.M. The influence of ST and HT quality management practices on performance /. M.M. Abdullah, J.J. Tari // Asian pacific management review. – 2012. – Vol.17, No. 2. – P. 177-193.
3. Costa M. Simultaneous consideration of TQM and ISO 9000 on performance and motivation: an empirical study of Spanish companies / M. Costa, A. Lorentes, T.Choi // International Journal of Production Economics, – 2008. – No113, – P. 23–39.

4. Samson D. The relationship between total Quality management practices and operational performance / D. Samson, M. Terziovski // *Journal of Operations Management*. – 1999. – Vol. 17, No. 4. – P. 393–409.
5. Wei Jiang. Integrating SPC and EPC Methods for Quality Improvement / Jiang Wei, John V. Farr // *Quality Technology & Quantitative Management*, – 2007. – Vol. 4, No. 3. – P. 345 – 363.
6. Zhang Z. An instrument for measuring TQM implementation for Chinese manufacturing companies / Z. Zhang, A.B.Waszink, J. Wijngaard // *International Journal of Quality & Reliability Management*. – 2000, – Vol.17, No.7, – P.730 – 755.
7. Ламнауер Н.Ю. Прогнозування технологічної собівартості якісних виробів / Н. Ю. Ламнауер // *Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. Серия: экономические науки*. – 2008. – Выпуск 85. – С. 390 – 397.
8. Ламнауер Н. Ю. Контрольная карта для различных качеств точности / Н.Ю. Ламнауер // *Східно - Європейський журнал передових технологій*. – 2011. – 3/7(51). – С. 23–26.
9. Ламнауер Н. Ю. Модель распределения размеров изделий и ее применение для оценки точности обработки / Н.Ю. Ламнауер // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №27. – С. 98 – 107.
10. Ламнауер, Н. Ю. Загальна модель розподілу лінійних розмірів деталей та її застосування для поліпшення якості виробів / Н. Ю. Ламнауер // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». -2013. - № 54.- С.134-143.

References

1. Kurniati, N. & HueiYeh, R. & JangLin J. 2015, 'Quality inspection and maintenance: the Framework of interaction', *Procedia Manufacturing*, vol. 4, pp. 244–251.
2. Abdullah, M. & Tari, J. 2012, 'The influence of ST and HT quality management practices on performance', *Asian pacific management review*, vol. 17, no. 2, pp. 177–193.
3. Costa, M. & Lorentes, A. & Choi, T. 2008, 'Simultaneous consideration of TQM and ISO 9000 on performance and motivation: an empirical study of Spanish companies', *International Journal of Production Economics*, no113, pp. 23–39.
4. Samson, D. & Terziovski M. 1999, 'The relationship between total Quality management practices and operational performance', *Journal of Operations Management*, vol. 17, no. 4, pp. 393–409.
5. Jiang, W. & Farr, J. 2007, 'Integrating SPC and EPC Methods for Quality Improvement', *Quality Technology & Quantitative Management*, vol. 4, no. 3, pp. 345 – 363.
6. Zhang, Z. & Waszink, A. & Wijngaard, J. 2000, 'An instrument for measuring TQM implementation for Chinese manufacturing companies', *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol.17, no.7, pp.730 – 755.
7. Lamnauer, N. 2008, 'Prohnozuvannia tekhnolohichnoi sobivartosti yakisnykh vyrobiv', *Kommunal'noe hozyajstvo gorodov. Nauchno-tekhnicheskij sbornik*, Ser.: ekonomicheskie nauki, no. 85, pp. 390 – 397.
8. Lamnauer, N. 2011, 'Kontrolnaya karta dlya razlichnykh kvalitetov tochnosti', *Skhidno - Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, no. 3/7(51), pp. 23-26.
9. Lamnauer, N. 2012, 'Model raspredeleniya razmerov szdeliy i yeye primeneniye dlya ocenki tochnosti obrabotki', *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskyi politekhnichniy instytut"*, Ser.: Matematychno modeliuвання v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh, no. 27, pp. 98-107.
10. Lamnauer, N. 2013, 'Zagalna model raspredeleniya liniynih rozmiriv detaliy ta yiyi zastosuvannya dlya polipshennya yakosti virobiv', *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskyi politekhnichniy instytut"*, Ser.: Matematychno modeliuвання v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh, no. 54, pp. 134-143.

Стаття надійшла до редакції 11 жовтня 2019 р.

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-92-107

UDC 621.002.5-52:621.771.07:658.587

IMPROVING THE PROCESS OF HEATING THE BANDAGES OF LARGE COMPOSITE ROLLING ROLLS TO BE DISMANTLED

©Lebed' V. T., Zaliatov A. F.

Donbass State Engineering Academy

Information about the authors:

Lebed' Vladimir Timofeyevich: vl.ti.lebed@gmail.com; doctor of technical sciences, associate professor of the department "Processes of automation production"; Donbass State Engineering Academy, 72, Academic street, Kramatorsk, Donetsk Region, Ukraine, 84313

Zaliatov Artem Faritovich: arty1783@gmail.com; assistant of the department "Processes of automation production"; Donbass State Engineering Academy, 72, Academic street, Kramatorsk, Donetsk Region, Ukraine, 84313

One of the directions which ensures a significant economic effect in resource- and energy-intensive technologies is the process of restoring the large-sized composite rolls for rolling mills. The defining operation of this process is the separation of the mating bandage and the roll's axis by thermal action on the embracing part. The general principles and results of the development, research and creation of an improved technological process for heating the products under study in a high-speed heating furnace have been described.

An integrated approach to solving the problem, based on theoretical and experimental studies, made it possible to develop a mathematical model of the process of dismantling large-sized composite rolls by thermal action on the basis of the put forward hypothesis and preliminary results of laboratory studies.

The development of the mathematical model is based on the process of rotation of the roll when it is being heated in the furnace and the subsequent dismantling of the bandage from the axis of the composite roll.

The methods of modeling the multi-mass electromechanical systems in relation to the drive of a high-speed heating furnace have been analyzed.

The dynamic model of the process of opening the bandage has been investigated and analyzed. Preliminary results have been obtained that characterize the operation of a dynamic system.

The expediency of subsequent research and development of the control system for the optimal performing of the heating process of the roll has been established.

Key words: composite rolls; thermal dismantling; heating furnaces; automatic control

Лебідь В. Т., Залятов А. Ф. «Удосконалення процесу нагріву бандажів великогабаритних складених вальцювальних валків, які підлягають демонтажу»

Одним з напрямків, що забезпечує значний економічний ефект в ресурсо- та енергоємних технологіях є процес відновлення великогабаритних складених прокатних валків. Визначальною операцією цього процесу є роз'єднання пов'язаних бандажа та вісі виробу шляхом термодії на їх охоплюючу деталь. Викладено загальні положення і результати розробки, дослідження і створення вдосконаленого технологічного процесу нагріву досліджуваних виробів в печі швидкісного нагріву.

Комплексний підхід до вирішення завдання, що базується на теоретичних і експериментальних дослідженнях дозволив розробити математичний модель процесу демонтажу великогабаритних складених валків термодією на підставі висунутої гіпотези і попередніх результатів виконаних лабораторних досліджень.

В основу розробки математичних моделі покладено процес обертання валка при його нагріванні в печі і подальшого демонтажу бандажа з осі складеного виробу.

Проаналізовано методи моделювання багатомасових електромеханічних систем стосовно приводу печі швидкісного нагріву.

Досліджено та проаналізовано динамічна модель процесу розкриття бандажа. Отримані попередні результати, які характеризують роботу динамічної системи.

Встановлено доцільність подальшого виконання досліджень і розробки системи управління для оптимального проведення процесу нагріву виробу.

Ключові слова: складені валки; термічний демонтаж термодією; опалювальні печі; автоматичне управління

Лебедь В. Т., Залиатов А. Ф. «Совершенствование процесса нагрева бандажей крупногабаритных составных прокатных валков, подлежащих демонтажу»

Одним из направлений, обеспечивающим значительный экономический эффект в ресурсо- и энергоемких технологиях является процесс восстановления крупногабаритных составных прокатных валков. Определяющей операцией этого процесса является разъединение сопряженных бандажа и оси изделия путем термовоздействия на их охватывающую деталь. Изложены общие положения и результаты разработки, исследования и создания усовершенствованного технологического процесса нагрева изучаемых изделий в печи скоростного нагрева.

Комплексный подход к решению задачи, базирующийся на теоретических и экспериментальных исследованиях позволил разработать математическую модель процесса демонтажа крупногабаритных составных валков термовоздействием на основании выдвинутой гипотезы и предварительных результатах выполненных лабораторных исследований.

В основу разработки математической модели положен процесс вращения вала при его нагревании в печи и последующего демонтажа бандажа с оси составного изделия.

Проанализованы методы моделирования многомассовых электромеханических систем применительно к приводу печи скоростного нагрева. Исследована и проанализована динамическая модель процесса раскрытия бандажа.

Получены предварительные результаты, которые характеризуют работу динамической системы.

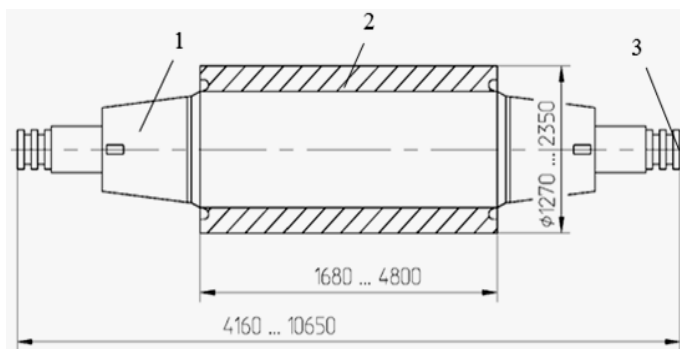
Установлена целесообразность последующего выполнения исследований и разработки системы управления для оптимального проведения процесса нагрева изделия.

Ключевые слова: составные валки; демонтаж термовоздействием; нагревательные печи; автоматическое управление

1. Relevance of the work

One of the effective areas related to resource - and energy-intensive technologies is the process of restoring the heavy-weight products related to bodies of rotation [1].

These are, for example, Large-sized Composite Rolling Rolls (LSCR) (Fig. 1), which have worked out their resources and can be the subject to subsequent restoration or can be used as high-quality billets.



1 - axis of the rolling roll; 2 - bandage; 3 - plugs

Figure 1- Compound rolling roll



Figure 2 - High-speed heating furnace (FHF)

2. Purpose and objectives of the article

The aim of the research was the development, research and creation of an improved technological process for heating process LSCR in a fast heating furnace (FHF) (Fig. 2) for dismantling.

At the same time, the creation of a control system was considered for this process with a help of information-measuring control system for the disclosure of the embraced and embracing parts (EEP) of the LSCR in FHF for the subsequent dismantling of this product [2].

In accordance with the set goal, the following was accomplished:

- 1). Analysis of the heating functions under consideration of the LSCR in FHF [3].
- 2). The developments of physical and mathematical models of the process for disclosing of the mating parts during heating of LSCR in FHF;
- 3). Mathematical modeling of the heating process of LSCR for dismantling;
- 4). Experimental system for controlling the separation of EEP.

Scientific novelty lies in:

- 1) Putting forward a theoretical hypothesis of the process of heating the bandage of the composite product in the FHF for its dismantling;
- 2) The confirmation of theoretical developments by experimental studies.

The introduction of the developed measuring system will increase the efficiency of dismantling of composite heavy weight rolls (CHWR) for the entire range of sizes that can be placed in the FHF [5].

Theoretical and experimental studies based on the hypothesis [4, 5], which has been put forward about the change in the position of the center of bandage's mass relative to its axis, will make it possible to further optimize the process of thermal dismantling.

The results of the research will allow:

- to lay the groundwork for the development of an intelligent control system for the displacement of the center of mass of the bandage during the heating and disclosure process of the EEP of the composite rolls;
- to monitor and register a number of parameters of the heating operation in real time to display the process on the monitor of the operator's panel.

This allows to ensure a significant reduction in energy consumption for heating operations in the furnace.

The object of the research is the process of heating the bandage LSCR in FHF.

The practical value of the research lies in the development of a mathematical model and the creation of the basic prerequisites for the subsequent development of a measuring system that allows you to control the process of opening the EEP when heating the bandage in the FHF. This will make it possible to lay down the basic provisions for controlling the process of heating of the bandage in FHF when the process will be implemented in an industrial environment.

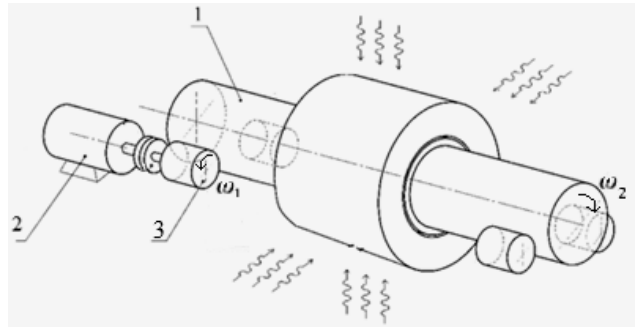
3. Analysis of published literature

A search on the topic of research performed in the scientific and technical information environment of the countries of Great Britain, Germany, Italy, Russia, the USA, France, the Czech Republic, and Japan showed that there are partial studies on the reuse of equivalent standard sizes of composite rolls, as well as the use of composite rolls with a set of interchangeable bandages at some foreign enterprises (for example, Union Electric Steel (USA), Kobe Steel (Japan)) [1, 6-9]. Given the results of a patent search, having studied the solutions found for thermal dismantling of such products, it is acceptable to conclude that this topic of research in heavy engineering is important.

4. The main part

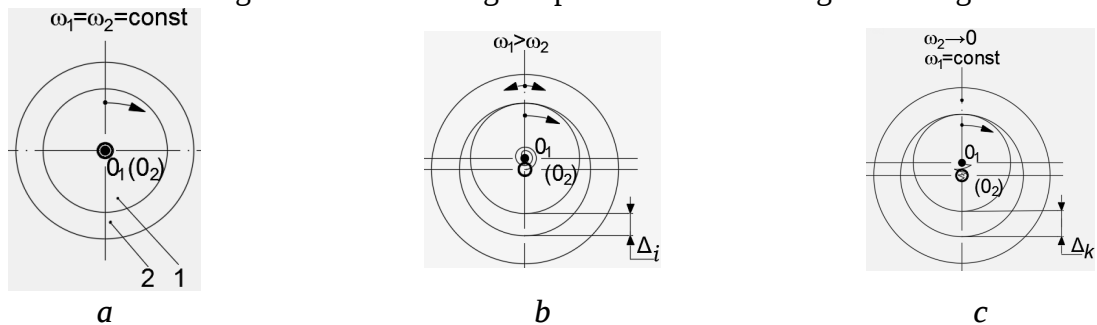
In the process of heating a uniform rotating bandage in the FHF (Fig. 3), its inner diameter undergo changes.

In this case, the positions of the center of the bandage's axis relative to the center of the axis of the roll and the speed of rotation (rotation) of the bandage (2) relative to the center of the axis of the roll (1) are being changed (Fig.3).



1 - composite roll, 2 - electric motor, 3 - driving roller

Figure 3 - Maintaining the process of the bandage's heating



1 - axis of the roll; 2 – bandage

a- condition of the product before heating the bandage CHWR; *b*- in the process of heating the bandage; *c* - the position of the heated bandage on the roll's axis at the final stage;

Δ_i - is the intermediate clearance; Δ_k - is the final value of the gap.

Figure 4 - Changing the position of the center of mass of the parts of the composite roll during heating of the bandage in the FHF

Consideration of the technological process of dismantling a large composite roll under the influence of heating in the FHF is represented by three interacting subsystems: 1) a bandage and 2) the axis of the composite roll; 3) an electric drive of the FHF rotation mechanism.

The structure of the model is presented in two parts: the electric, which includes the control system, electric drive, feedback sensors, and mechanical part consisting of a bandage and the axis of the composite roll [9].

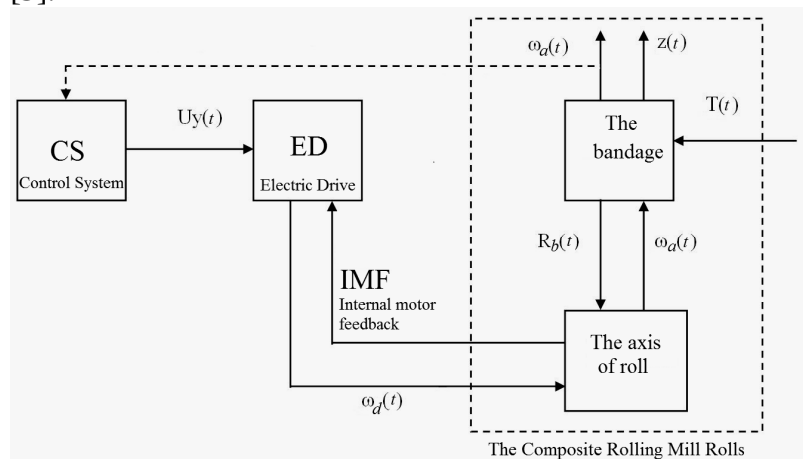


Figure 5 - Structural diagram of the dismantling process

The considered structural diagram of the technological process (Fig. 5) allows you to build a physical and mathematical model of the process of heating the bandage for dismantling the composite roll. To implement the mathematical model, analytical [10, 11] and experimental methods have been used [12, 13]. The analytical method allows to create a computational-theoretical model of the

processes occurring in the object under scrutiny in accordance with the equations which describe the physical laws. The coefficients of these equations are the physical parameters obtained by theoretical research and characterize the object and the working processes in it: - structural elements of the object; - parameters of the working body; - heat transfer coefficients, etc. The model under consideration allows us to reveal the physical essence of the main stages of the process under study and analyze the change in the parameters of the EEP and the course of the heating operation [4, 5].

Due to the lack of the possibility to measure directly the controlled parameters of the reliability of these process characteristics and calculating the values of the coefficients, difficulties arise when describing the equations. The equations describing electric and thermal parameters are derived on the basis of the known design parameters and characteristics of a theoretical analysis of the processes which occur in the object under scrutiny. The experimental part of the simulation is to obtain the transient characteristics of the object.

During the implementation of the FHF heating process, the composite roll band is heated in the HSHF.

It is known [14] that the diameter of the bandage varies according to the linear law:

$$d_1 = d \times (1 + a \times T)$$

where d_1 - is the diameter of the bandage under the influence of temperature t ;

d - is the output diameter of the bandage;

a - is the coefficient of linear expansion of the metal (for steel 13.1×10^{-6});

T - heating temperature, °C

The gap $Z(t)$ between the bandage and the axis of the composite roll can be determined by the formula:

$$Z(t) = d_1(t) - d$$

The speed of rotation of the bandage depends on the speed of rotation of the CHWR and the contact area of the connected inner surfaces of the axle and the bandage [15 – 17]. The equations of the process under scrutiny have the form:

$$w_B(t) = \begin{cases} w_B & a(t) < a_p \\ w_B \times \frac{k}{T_1 p^2 + T_2 \times p + 1} & Z < Z_k, a(t) \geq a_p, \\ w_B \times \frac{1}{T_1 p^2 + T_2 \times p + 1} \cdot \ddot{Z} & Z \geq Z_k \end{cases}$$

where k - is the gain and

T_1 and T_2 - time constant of the electric part of the drive;

w_B and w_B - the speed of the bandage and roll respectively;

a_p - the opening angle at which the area of contact of the inner surface of the bandage with the surface of the roll does not provide rigidity;

Z_k - the required gap value.

When operating an electric motor, the torque of the motor must balance the static resistance of the working machine and the dynamic torque caused by the inertia of the moving masses. The equation of moments of the electric drive can be written in the form:

$$M = M_C + M_{дин},$$

where M - moment of the electric motor;

M_C - static moment of resistance;

$M_{дин}$ - dynamic moment.

Dynamic or inertial moment, as you know from mechanics, is equal to:

$$M_{\text{дин}} = J \times \frac{dw}{dt},$$

where J - is the moment of inertia of the moving masses, reduced to the motor shaft, kg / m^2 ; w - angular speed of the motor shaft, c^{-1} .

The moment of inertia of the bandage changes in time due to the change in the inner diameter of the bandage:

$$M = M_C + M_{\text{дин}},$$

$$J_b(t) = \frac{1}{2} \times m_b \times R^2 + \frac{d_i(t)}{2} \times \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\theta}}$$

where m_b - mass of the bandage.

In the Laplace formula, the velocity equation can be expressed as:

$$w(p) = \frac{M_d(p) - M_p(p)}{J \times p},$$

where M_p - the moment that takes into account the process of disclosure. Asynchronous motor equations have the form:

$$w_B(p) = \frac{M(p) - M_C(p) - M_p(p)}{J \times p},$$

$$M(p) = \frac{w_0 - w_B(p)}{T_j \times p + 1}.$$

Fig. 6 shows the model of the drive. Experimental studies were conducted on a personal computer using the Mat Lab software application.

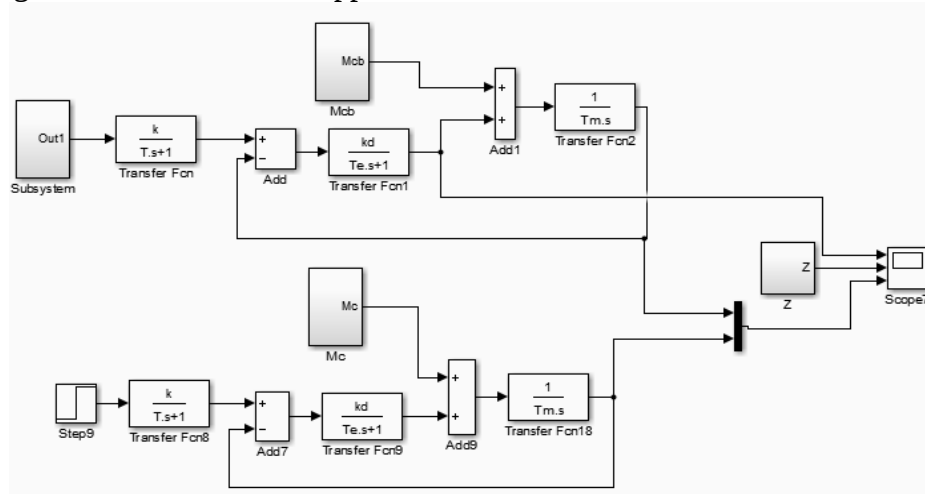


Figure 6 - Mathematical model of the drive

Fig. 8, 9 summarize the results obtained in the simulation. The dependence of the opening angle on the current gap value Δ is established. As an example, a composite at mill roll of a thick-sheet mill has been considered.

A number of basic discrete values of the diameter of the bandage during its heating were determined $D_{1..5} = 1201.0\text{mm}$ (a); 1201.5mm (b); 1202.0mm (c); 1203.0mm (d); 1204.0mm (f); where $d = 1000\text{ mm}$ is the nominal diameter of the fitting surface of the roll axis (Fig. 7).

According to the analysis (Fig. 7), its diameter increases during the heating of the bandage, and in the result of which, the contact area of the mating surfaces of the bodies of revolution decreases and oscillations of the embracing part of the product appear, which disappear after the for-

mation of the required gap is completed (Fig. 8) The results of technical solutions for the automation of this process are reflected in the following works [18- 21].

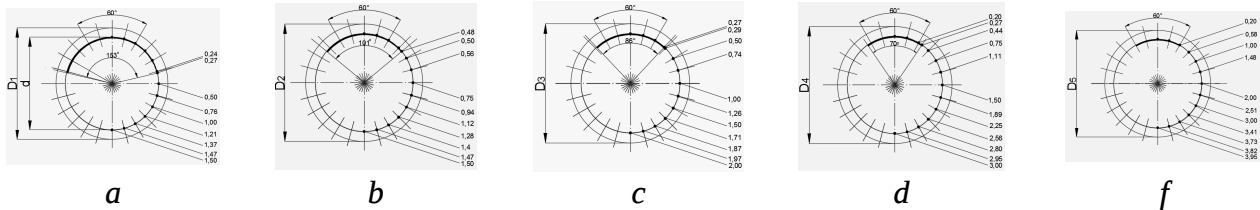


Figure 7- The calculated angle of the contact surface of the bandage and the axis of the roll when changing the diameter of the bandage during its heating

For step-by-step confirmation (or refutation) of the theoretical hypothesis of the trajectory of motion of the center of mass of the bandage relative to the center of mass of the axle and to test the possibility of fixing the disconnection of the EEP using IR sensors, an experimental facility was created.

The industrial facility (Fig. 9) consists of a FHF model (which includes a frame, electric motor, a clutch and support rollers) and a LSCR model (roll axis and four interchangeable bushings).

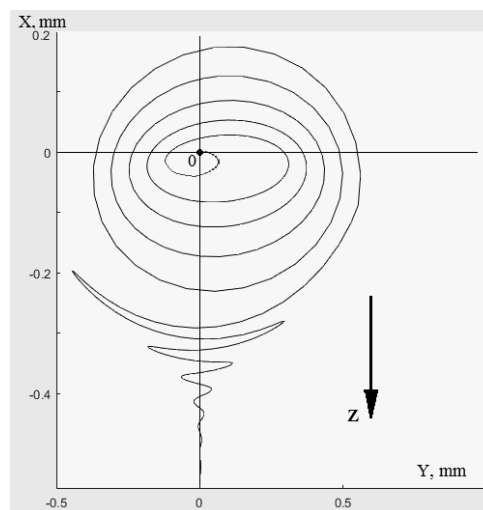


Figure 8 - The trajectory of the center of mass of the bandage at changing the inner diameter

The product under study is a model of LSCR in a ratio of 1:20.

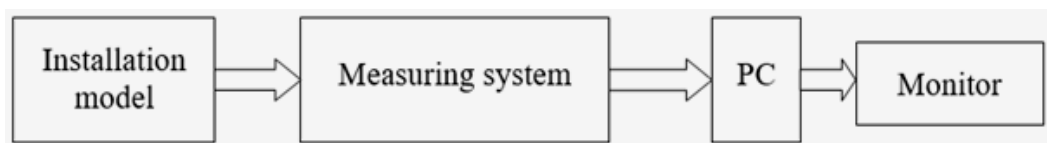


Figure 9 - Block diagram of the experimental model

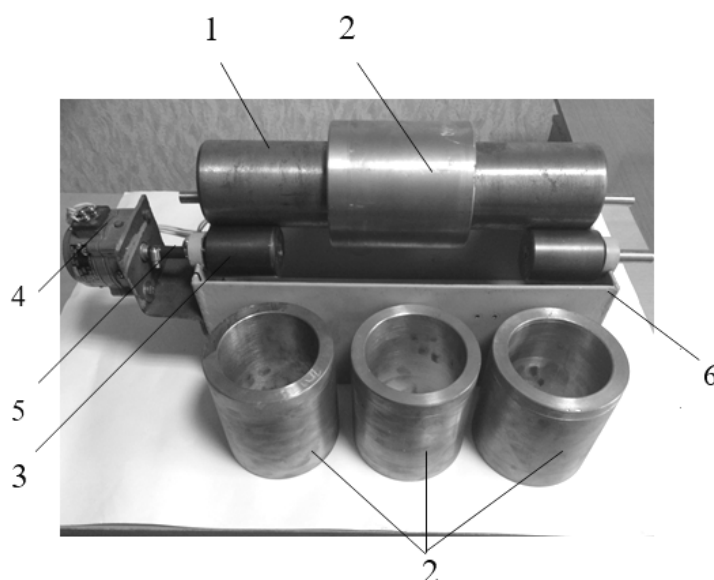
During the implementation of the technological process rotating bandage LSCR is heated in FHF. In the laboratory conditions of the department it is not possible to perform diameters, based on the calculation of the linear expansion of metal at 100, 200, 300 degrees Celsius.

In the general version, the LSCR model has the following characteristics: axle length - 422 mm; diameter - 100 mm and its mass - 25 kg; length of the sleeve - 140 mm and its inner diameter, mm: 100.0 (with tension); 100.1 (for temperatures 100° C); 100.4 (200°C); 100.8 (300°C), respectively; its outer diameter is 121 mm; weight of one bushing 8.8 kg.

The rotation of the axis is provided by rollers on which the axis of the model of the composite roller. One of the rollers is connected to the RD-09A motor via the clutch (Fig. 10). The electric motor ensures four revolutions per minute, which is the closest to the actual technological process. The industrial installation model is shown in Fig. 10.

In the laboratory conditions of the department it is not possible to perform heating, therefore, to simulate the expansion of the bandage under the influence of high temperatures (up to 920°C) bushings were made, with different internal.

The characteristics of the engine are given in table 1.



1 – roll axis; 2 – bandage; 3 – support rollers; 4 – electric motor PD-09A; 5 – coupling; 6 – frame

Figure 10 – Industrial plant model

Table 1 - Characteristics of the RD-09A electric motor

Parameter	Value
Power supply voltage, V	127
Frequency, Hz	50
Idle current, A	0,1
Frequency of revolutions, rpm	1200
Power, W	10
Reduction	1/137

For the processing of information, measurements and data transmission to the I / O device, a measuring system is created, which is shown in Fig. 11.

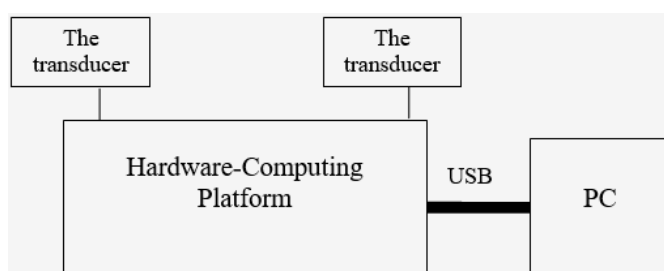


Figure 11 – Structural diagram of the measuring system

Based on the functionality of the installation, the Arduino UNO board was chosen as the hardware and computing platform. The choice is due to the fact that the board in its design has already a power controller, a microcontroller, a programmer, interfaces for connecting devices (Fig. 12) and software libraries, which facilitate the work of creating the measuring system. At the conceptual level, all boards are programmed via RS-232 (serial connection), but the implementation of this method is different depending on the version. The Serial Arduino board contains a simple inverted circuit for converting RS-232 signal levels. Current boards, such as Diecimila, are programmed via USB due to USB- to -serial converter chip. The Arduino Integrated Development Environment is a cross-platform Java application that includes a code editor, a compiler and a firmware transmission module [22].

Based on the block diagram (Fig. 11), sensors are selected that will measure the position of the centers of mass of the bandage and the axis of the roll relative to each other. The choice of sensors is due to the accuracy of the input data conversion to the output, the range of measurement, optimal geometric parameters and mass, the reliability of installation and operation cost.

The Arduino Integrated Development Environment compares two types of TCRT5000 and SHARP-GP2Y0A710K0F sensors by the above criteria. It is stated that TCRT5000 corresponds to the experimental setup better than the SHARP-GP2Y0A710K0F. In the table 2 their characteristics are shown.

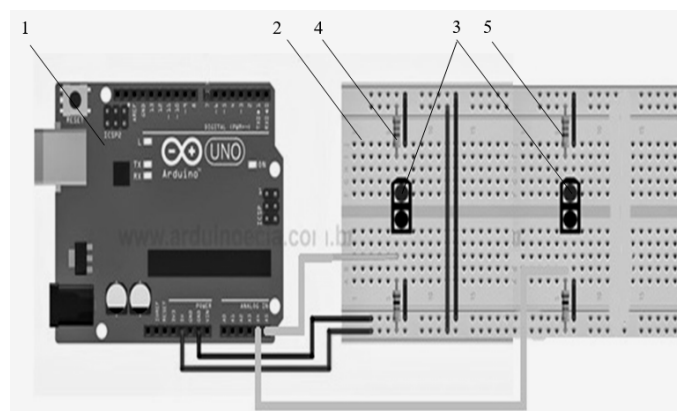
Table 2 - Sensor characteristics

Parameter	TCRT5000	SHARP-GP2Y0A710K0F
Range, mm	1-15	1000-5500
Accuracy, mm	0.2	0.3
Dimensions, mm	7x7x12	58.0 x 17.6 x 22.5
The cost is \$	0.8	11.2

The distance to the object by the sensor is determined by triangulation. The light pulse (in the IR range: 850 ± 70 nm [23]) is emitted and reflected back from the obstacle. The angle of falling the light beam depends on the distance to the reflecting object. Triangulation works by detecting this reflected beam and identifying a reflection angle from which the distance is determined.

The measurement system of the experimental unit should be flexible to certain changes, namely: adding more sensors to the system; changing the positions of the sensors relative to each other; the change of sensor connections. Therefore, it is advisable to use a circuit board on which all the elements are fixed without soldering and are connected by wires.

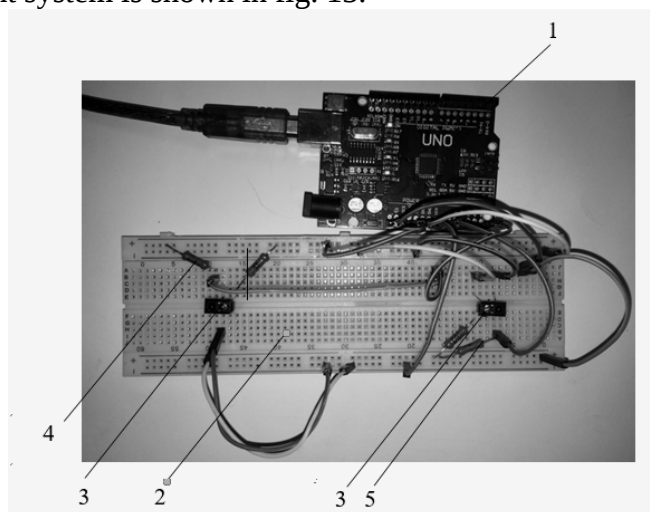
The diagram of connection of the sensor to the Arduino board is shown in Fig. 12.



- 1 – Arduino hardware and computing platform; 2 – bread board;
3 – IR sensors; 4 – resistance 510 Om; 5 – resistance 10 Kom

Figure 12 – Circuit for connecting of sensors to the board Arduino

The measurement system is shown in fig. 13.



1 – Arduino hardware and computing platform; 2 – bread board;
3 – IR sensors; 4 – resistance 510 Ohm; 5 – resistance 10 Kohm

Figure 13 – Measuring system

Considering the above, a program has been created that measures the output voltage from the sensor (0 ... 5 V) and converts it to a numerical distance value based on the characteristics of the sensor.

The general view of the experimental unit is shown in Fig. 14

This ensured the connection of the board to the sensors and obtaining the values. Since Arduino is one of the most convenient ways of programming the tools on microcontrollers, the device programming language is based on C / C ++ [22]. Any Arduino application has two required functions: `setup ()` and `loop ()`. The `Setup ()` function is started once, after each connection to power. This function is used to initialize variables, to set the mode of operation of digital ports etc.



Figure 14 - General view of the experimental setup.

An Arduino board was programmed for the experimental studies on the installation.

The above function initializes the required variables of type double (floating point variables are larger than the normal float variables). In these function analog ports 0 and 5 are started to which sensors are connected [22]. The `loop ()` function in an infinite loop consistently executes the commands described in its hardware. This means that when the function is completed, it will be called again [19]. In this function, the variables declared above, are assigned values which come to ports 0 and 5 from the sensors.

The values range from 0 to 1024, since Arduino has an ADC (bit-to-digital converter) of bit depth 10.

After the values are received, data is transmitted via the COM port. Since there are two sensors in the experimental setup, the decision has been taken to divide values by the symbol "\$». Based on the above, we have the initial program algorithm for the Arduino board shown in Fig. 15.

It is known [23], that infrared sensors are sufficiently sensitive to environmental factors (light, heat, etc.), which results in inaccurate readings (up to 25%). The sensors are planned to be installed directly under the rotating shaft, which rotates and this adds such an exciting factor as vibration. Based on the above, it was decided to introduce a signal filter for the board into the program.

The Kalman filter (FC) [24] is an efficient recursive filter that estimates the state vector of a dynamic system using a series of incomplete and noisy measurements.

The algorithm operates in two stages. At the stage of forecasting, the FC extrapolates the values of the state variables as well as their uncertainties. At the second stage, according to the measurement results, the extrapolation result is specified. Due to the step-by-step nature of the algorithm, it is possible to track the state of an object in real time (using only current measurements and information about the previous state and its uncertainty). Based on the above, it was decided to implement the FC programmatically. Since the information comes from two sensors in the experimental setup, both signals need to be filtered.

Software FC is implemented separately from the sensor located under the axis of the shaft and for the sensor which is to be mounted under the bandage of the shaft. The average deviation is calculated in Excel. The function calculates the average deviation from the column (A) into which the unfiltered values from the sensors are to be entered.

The rate of response to change the values is to be set by the experimenter, based on the requirements for the time of the experiment, and it is 0.05. After the introduction of FC to the Arduino hardware and computing platform, we have the final version of the program algorithm for Arduino (Fig. 16).

A complete code listing for the Arduino hardware platform has been developed. Microsoft's Visual Studio 2010 solution has been chosen as the development environment. It is planned to create software in Visual Basic .NET [25].

A complete code listing of the software for the hardware has been developed. This language is based on a .NET framework (works with CLR), and a programming language has also been developed.

Considering the advantages and disadvantages of VB.NET programming language, it was decided to synthesize software for experimental installation in VB.NET. Based on the functionality of the program, an algorithm for the future software product has been created (Fig. 17).

Based on the functionality of the program, it was decided to create an experimenter's workplace (program interface).

The automated workplace (AWP) should contain the following components: fields for entering geometric data of the study object and experiment number; fields for selecting the connection port and data rate; element of graphic image of received data; information about the time of the experiment; experiment start button. The picture of the workplace is shown in Fig. 18.

Based on the functionality of the program, we built the algorithm. A serial port is used to communicate between the board and the PC. On this basis, we will add to the program the element SerialPort, which is a serial connection resource.

The project folder already has a database in which it is planned to store the values obtained during the experiment. Once connected to the board, a table is created in the database. The table name consists of information such as the experiment number and the date and time of the experiment. After that, the Splter and Splter Two functions separate the value of the sensor under the axis from the value of the sensor under the bandage, separated by the symbol "\$".

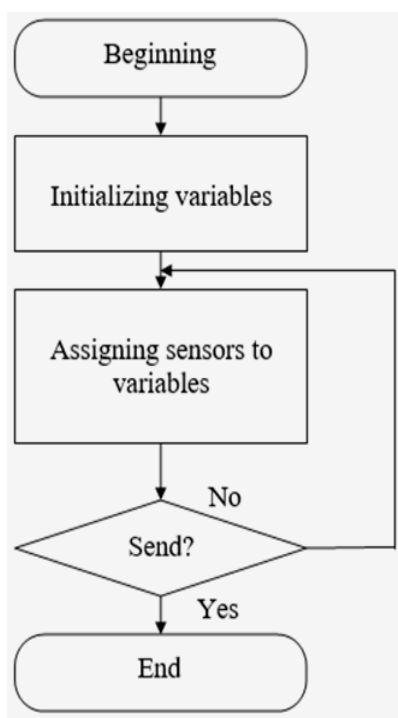


Figure 15 - Initial program algorithm for the Arduino platform

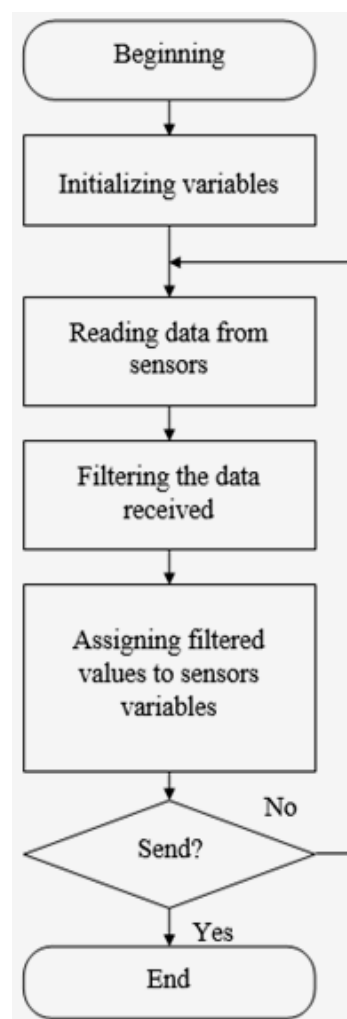


Figure 16 - The final version of the program algorithm for Arduino

The program ignores if the data from the board is more than 1024. This allows you to separate the erroneous reading of unnecessary signals. Otherwise, a point is created on the graph (the value of the sensors relative to time), and the process is repeated again. It also records to the database where the result of the experiment, axis and bandage parameters, experiment number and time are recorded. The distance between EEP is determined mathematically by looking at the value from the board. Full program code listing has been developed.

At the first stage of the experiment, a roll with a bandage is to be installed the inside diameter of which was 100.0 mm. The valid interval of the first stage of the experiment is 0.02 mm.

Based on the data obtained during the experiment, it was found that the measurement error at this stage was up to 22 %.

The previous obtained values testify that it is possible to measure the separation of the roller axis and the bandage by the developed measuring system.

For further (complete) verification it is advisable to make a number of changes to the measuring system, for example, to increase the number of sensors (up to eight); to use a higher bit analog digital converter (ADC); install the sensors at an angle of 45° relative to each other along the forming (forming) surface of the bandage.

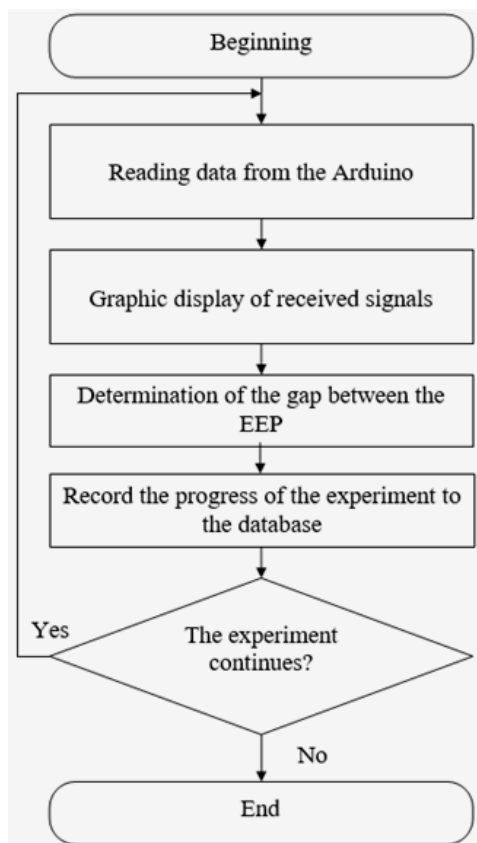


Figure 17 - The algorithm of the program for processing data from the Arduino card on the computer

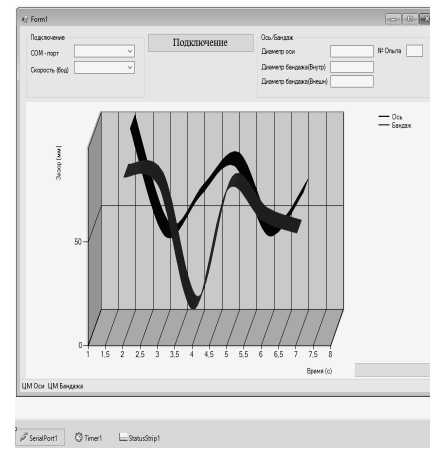


Figure 18 - The experimenter's AWP

5. Conclusions

1. A review and analysis of the sources of technical information, as well as the market for raw materials and capabilities of potential customers, shows that in the process of reuse of dismantled parts of the LSCR there is a large reserve of savings.

2. It is established that due to the existing technology of dismantling the LSCR, the machine-building enterprises can obtain parts for the restoration of the rolls; high quality workpieces for rolls of smaller size; high quality workpieces for various other parts.

3. The stage of heating of the rolls for further process of dismantling was considered and performed on the basis of modern methods of automation (to control the disengagement of the conjugated surfaces) based on the use of new equipment (partially, FHF), which ensures increased profitability of operations of disassembly and improvement the quality of service.

4. In order to test the theoretical hypothesis, an experimental setup has been developed, consisting of FHF and CHWR models with ratio to 1:20. To simulate the expansion of the bandage under the influence of high temperatures were made bushings (bandages), with different internal diameters, based on the formula of linear expansion of the metal for 100, 200, 300 degrees Celsius, respectively.

5. A measuring system has been developed, consisting of: Arduino hardware and computing platform; two TCRT5000 sensors (one sensor measures the position of the center of mass of the axle and the other the bandage); the motherboard; the connecting wires.

The algorithm and software have been created to ensure the connection of the board with sensors and Arduino hardware platform.

After implementing FC into Arduino hardware platform we have the final version of the algorithm of the program for Arduino.

Experimenter AWP has been developed to provide visualization of the experiment process, logging and recording of the data obtained. Additionally the software in Visual Basic. NET has been developed.

Experimental studies have shown that this measuring system works correctly, responding to changes in bandage diameters. Accuracy, at this stage – up to 30%.

6. According to the received experimental data recommendations are made up for the design of an industrial installation. The automatic industrial installation system must consist of two S7-300 series programmable controllers; two Sinamics G120 frequency adjustable actuators; switching and relay contactor equipment. The installation must guarantee measurement accuracy of up to 1.5% and reliability of up to 90%.

7. Based on received calculations, which show that the biggest economic benefit is achieved due to roll restoration depending on sizes and energy savings.

The economic effect of re-assembling of the component supporting rolls with the restoration of the axle, on the example of the plate rolling mill of metallurgical plant with amounts to UAH 800,000.

The full economic effect consists of the economic benefit in the reconditioning of the compound support rolls and the additional economic advantage in the above mentioned sum due to the optimal heating of the bandage of the used roll.

Список використаних джерел:

1. Лебедь В. Т. Ресурсосбережение в тяжелом машиностроении. Реинжиниринг крупногабаритных изделий : монография / В. Т. Лебедь, А. А. Пермяков, А. Н. Шелковой. – Краматорск : ДГМА, 2015. – 301с.
2. Лебідь В. Т. Система контролю ведення процесу демонтажу великогабаритних складених виробів / В. Т. Лебідь, Є. І. Донченко, М. С. Ананьєв // Збірник тез доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу» (12-17 вересня 2017р.) / МОН України. – Херсон : Національний технічний університет, 2017. – С.159-160.
3. Гусовский В. Л. Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики) : справочник / В. Л. Гусовский, М. Г. Ладыгичев, А. Б. Усачев. – М. : Машиностроение, 2001. – 656 с.
4. Пат. 132043 Україна МПК. В21В 27/10 (2006.01), В21В 28/02 (2006.01). Спосіб розкриття спряжених деталей складених прокатних валків під демонтаж / Лебідь В. Т., Разживін О. В., Заліатов А. Ф., Лебідь Г. В., Пономарьов Д. С. ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201808768 ; заявл. 16.08.2018 ; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3. – 3 с
5. Пат. 130113 Україна МПК В21В 28/02 (2006.01), В21В 27/10 (2006.01). Спосіб розкриття спряжених деталей важковагових складених виробів під демонтаж / Лебідь В. Т., Разживін О. В., Донченко Є. І., Ананьєв М. С., Заліатов А. Ф. ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201805613 ; заявл. 21.05.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22. – 2 с
6. Suzuri A. Steel Casting and Forging Division : Kobe Steel LTD / A. Suzuri, M. Okamura. – Japan : Kobe, 1979. – № IV. – Рр. 4-9.
7. Полухин В. П. Составной рабочий инструмент прокатных станов / В. П. Полухин, П. И. Полухин, В. А. Николаев. – М. : Металлургия, 1977. – 88 с.
8. Планета НКМЗ. Часть II. Энциклопедия / авт.-сост. В. Зорина. – Краматорск, 2009. – 399 с.
9. Демонтаж составных прокатных валков методом форсированного нагрева / Ю. А. Грушко, Н. А. Адамова, Ю. А. Карасюк [и др.] // Сталь. – 1989. – № 7. – С. 64-66.
10. Complex of certainly element general-purpose programs, designed by the company «Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc» (HKS, USA). License N 44 of JSC «NKMZ». – November 2003. – 742 p.

11. Cosmos Works. User's Guide. 2000 Structural Research and Analysis Corporation / автор?. – Los Angeles; California, 2001. – 770 p.
12. Приборы и системы измерения вибрации, шума и удара : справочник; в 2-х кн. Кн. 1. / Под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1978. – 448 с.
13. Измерения в промышленности: справ.; в 3-х кн. Кн.3 Способы измерения и аппаратура : пер. с нем. / под ред. Профоса П. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1990. – 344 с.
14. Трофимова Т. И. Справочник по физике для студентов и абитуриентов / Т. И. Трофимова. – М. : Астрель : АСТ, 2001. – 399 с.
15. The effect of contact geometry on fretting wear rates and mechanisms for a high strengtysteel / A. R. Warmuth, S. R. Pearson, P. H. Shipway [et al.] // *Wear*. – 2013. – Vol. 301, Iss. 1–2. – Pp. 491-500.
16. Демидович Б. П. Краткий курс высшей математики : учеб. пособие для вузов / В. П. Демидович, В. А. Кудрявцев. – М. : Астрель : АСТ, 2001. – 656 с.
17. Лебідь В. Т. Математичне моделювання електромеханічної системи печі швидкісного нагріву під час демонтажу великогабаритних складених валків / В. Т. Лебідь, О. В. Суботін, А. Ф. Заліатов // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. : Обчислювальна техніка та автоматизація*. – Покровськ : ДонНТУ, 2018. – Вип. № 1 (31). – С. 14-22.
18. Пат. 129490 Україна МПК B21B 28/02 (2006.01), B21B 27/10 (2006.01) Спосіб контролю моменту роз'єднання бандажа з віссю важковагових складених прокатних валків під час нагрівання / Лебідь В. Т., Разживін О. В., Донченко Є. І., Ананьев М. С., Заліатов А. Ф.; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201806481 ; заявл. 11.06.2018 ; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. – 3 с.
19. Пат. 130746 Україна МПК G01R 19/00, B21B 28/02 (2006.01), B21B 27/10 (2006.01) Спосіб контролю проміжку розкриття спряжених деталей важковагових складених виробів під час нагрівання / Лебідь В. Т., Разживін О. В., Донченко Є. І., Ананьев М. С., Заліатов А. Ф. ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201806370 ; заявл. 07.06.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. – 2 с.
20. Пат. 130897 Україна МПК B21B 28/02 (2006.01), B21B 27/10 (2006.01), B21B 37/44 (2006.01). Спосіб контролю моменту роз'єднання бандажа з віссю важковагового складеного прокатного валка під час нагрівання / Лебідь В. Т., Разживін О. В., Донченко Є. І., Ананьев М. С., Заліатов А. Ф. ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201807828 ; заявл. 12.07.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. – 2 с.
21. Пат. 132455 Україна МПК B21B 28/02 (2006.01), B21B 27/10 (2006.01). Спосіб роз'єднання бандажа з віссю важковагового складеного прокатного валка під час термічної дії / Лебідь В. Т., Разживін О. В., Суботін О. В., Руденко В. М., Заліатов А. Ф. ; власник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201809806 ; заявл. 01.10.2018 ; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 4. – 4 с.
22. Arduino блокнот программиста. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://robocraft.ru>
23. Оптические датчики [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Оптические_датчики.
24. Фильтр Калмана [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://habrahabr.ru/post/166693>.
25. Все про VB.Net [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.vbnet.ru/>.

References

1. Lebed, VT Permjakov, AA & Shelkovej, AN 2015, 'Resursosberezhenie v tjazhelom mashinostroenii. Reinzhiniring krupnogabaritnyh izdelij', Donbasskaja gosudarstvennaja mashinostroitel'naja akademija, Kramatorsk
2. Lebid, VT, Donchenko, YeI & Ananiev, MS 2017, 'Systema kontroliu vedennia protsesu demontazhu velykohabarytnykh skladyenykh vyrobiv', Zbirnyk tez dopovidei III Mizhnarodnoi naukovy-praktychnoi konferentsii Suchasni tekhnologii promyslovoho kompleksu, Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Natsionalnyi tekhnichniy universytet, Kherson, pp.159-160..
3. Gusovskij, VL, Ladygichev, MG & Usachev, AB 2001, *Sovremennye nagrevatelnye i termicheskie pechi (konstrukcii i tehicheskie harakteristiki)*, Mashinostroenie, Moskva.
4. Lebid, VT, Razzhyvin, OV, Zaliatov, AF, Lebid, HV Ponomarov, DS 2019, *Sposib rozkryttia spriazhenykh*

detalei skladenykh prokatnykh valkiv pid demontazh, UA Patent 132043.

5. Lebid, VT, Razzhyvin, OV, Zaliatov, AF, Lebid, HV Ponomarov, DS 2019, Sposib rozkryttia spriazhenykh detalei vazhkovahovykh skladenykh vyrobiv pid demontazh, UA Patent 130113.

6. Suzuri, A & Okamura, M 1979, 'Steel Casting and Forging Division', ???, Kobe, no. IV, pp. 4-9.

7. Poluhin, VP, Poluhin, PI & Nikolaev, VA 1977, Sostavnoj rabochij instrument prokatnykh stanov, Metallurgija, Moskv.

8. Zorina, V 2009, Planeta NKMZ. Part II. Jenciklopedija, Kramatorsk, 2009.

9. Grushko, JuA, Adamova, NA, Karasjuk, JuA et al. 1989, 'Demontazh sostavnykh prokatnykh valkov metodom forsirovannogo nagreva', Stal, no. 7, pp. 64-66.

10. Complex of certainly element general-purpose programs, designed by the company «Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc» (HKS, USA). License N 44 of JSC «NKMZ» 2003.

11. ABTOP??? 2001, Cosmos Works. User's Guide. 2000 Structural Research and Analysis Corporation (SRAC,) Los Angeles.

12. Kljuev, VV (ed.) 1978, Pribory i sistemy izmerenija vibracii, shuma i udara, book 1, Mashinostroenie, Moskva.

13. Profos, P (ed.) 1990, Izmerenija v promyshlennosti, book 3 Sposoby izmerenija i apparatura, 2nd edn, Metallurgija, Moskva.

14. Trofimova, TI 2001, Spravochnik po fizike dlja studentov i abiturientov, Astrel, AST, Moskva.

15. Warmuth, AR, Pearson, SR, Shipway, PH & Sun, W 2013, 'The effect of contact geometry on fretting wear rates and mechanisms for a high strengtysteel', Wear, vol. 301, iss, pp. 491-500.

16. Demidovich, BP & Kudrjavcev, VA 2001, Kratkij kurs vysshej matematiki, Astrel, AST, Moskva.

17. Lebid, VT, Subotin, OV & Zaliatov, AF 2018, 'Matematychni modeliuvannia elektromekhanichnoi systemy pechi shvydkisnogo nahrivu pid chas demontazhu velykohabarytnykh skladenykh valkiv', Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnogo tekhnichnogo universytetu. Serii Obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia, Donetskij natsionalnyi tekhnichnyi universytet, Pokrovsk, iss.1(31), pp. 14-22.

18. Lebid, VT, Razzhyvin, OV, Donchenko, YeI, Ananov, MS & Zaliatov, AF 2018, Sposib kontroliu momentu roziednannia bandazha z vissiu vazhkovahovykh skladenykh prokatnykh valkiv pid chas nahrivannia, UA Patent 129490.

19. Lebid, VT, Razzhyvin, OV, Donchenko, YeI, Ananov, MS & Zaliatov, AF 2018, Sposib kontroliu promizhku rozkryttia spriazhenykh detalei vazhkovahovykh skladenykh vyrobiv pid chas nahrivannia, UA Patent 130746.

20. Lebid, VT, Razzhyvin, OV, Donchenko, YeI, Ananov, MS & Zaliatov, AF 2018, Sposib kontroliu momentu roziednannia bandazha z vissiu vazhkovahovoho skladenoho prokatnogo valka pid chas nahrivannia, UA Patent 130897.

21. Lebid, VT, Razzhyvin, OV, Subotin, OV, Rudenko, VM & Zaliatov, AF 2018, Sposib roziednannia bandazha z vissiu vazhkovahovoho skladenoho prokatnogo valka pid chas termichnoi dii, UA Patent 132455.

22. Arduino bloknot programmista, viewed ???, <<http://robocraft.ru>>.

23. Opticheskie datchiki, viewed , <https://ru.wikipedia.org/wiki/Opticheskie_datchiki>.

24. Filtr Kalmana 2013, viewed, <<https://habrahabr.ru/post/166693>>.

25. Vse pro VB.Net, viewed , <Rezhim dostupa <http://www.vbnet.ru/>>.

Стаття надійшла до редакції 15 жовтня 2019 р.

КОНТАКТНЫЕ ДАВЛЕНИЯ В СОЕДИНЕНИЯХ С ГАРАНТИРОВАННЫМ НАТЯГОМ

©Малицкий И. Ф., Смирнов И. П.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Информация об авторах:

Малицкий Игорь Федорович: ORCID: 0000-0003-0026-2791; malickiy1925@gmail.com; кандидат технических наук; доцент кафедры метало режущего оборудования и транспортных систем; Украинская инженерно-педагогическая академия; ул. Университетская, 16, г. Харьков, 61003, Украина.

Смирнов Игорь Петрович: ORCID: 0000-0002-5982-8123; smirnov_ip@gmail.com; кандидат технических наук; доцент кафедры интегрированных технологий в машиностроении и сварочного производства; Украинская инженерно-педагогическая академия; ул. Университетская, 16, г. Харьков, 61003, Украина.

В современном машиностроении широко применяются неподвижные соединения по посадке с гарантированным натягом, которые не требуют дополнительных деталей для их надежного соединения. Выбор необходимой посадки производится на основании расчета необходимых контактных давлений в сопряжении. При этом, с одной стороны, контактное давление должно обеспечивать требуемую прочность соединения на сдвиг и проворачивание, а с другой - не должно превышать пределов текучести материалов соединяемых деталей.

Основным параметром, обеспечивающим прочность сопряжения на сдвиг и кручение, является величина контактного давления. Минимально необходимое контактное давление в сопряжении определяют из условия превышения силой трения сдвигающих и проворачивающих усилий. Максимально допустимое удельное контактное давление в соединении, при котором отсутствует пластическая деформация на контактных поверхностях соединяемых деталей, определяется по теории наибольших касательных напряжений

Контактное давление при известной величине натяга принято определять решением задачи Ляме и принимать постоянным по всей длине сопряжения.

В подавляющем же большинстве случаев охватываемая деталь длиннее охватывающей. При этом распределение контактного давления по длине соединения имеет более сложный характер, зависящий от линейных размеров сопрягаемых деталей, их формы, шероховатости поверхности, метода сборки и ряда других факторов, которые формула Ляме не учитывает. Деформация той части вала, на которую посажена охватывающая деталь, по длине сопряжения неравномерна. Выступающие части охватываемой детали, выходящей за пределы охватывающей, препятствуют радиальному перемещению смежных сечений, что приводит к концентрации напряжений у краев охватывающей детали. Таким образом, истинное распределение давлений по длине соединения остается не выявленным.

В статье поставлена и решена задача экспериментально определить фактические контактные давления в соединении с гарантированным натягом и сравнить их с расчетными по общепринятой методике значениями.

В результате проведенных исследований были найдены фактические контактные давления в соединении с гарантированным натягом и приведены поправочные коэффициенты в зависимости от способа сборки соединяемых деталей.

Ключевые слова: посадка с натягом, прочность сопряжения, контактное давление, формула Ляме, концентрация напряжений, охватываемая деталь, охватывающая деталь, прессовая сборка, сборка с нагревом.

Малицкий И.Ф., Смирнов И.П. «Контактний тиск в з'єднаннях з гарантованим натягом».

У сучасному машинобудуванні широко застосовуються нерухомі з'єднання по посадці з гарантованим натягом, які не вимагають додаткових деталей для їх надійного сполучення. Вибір необхідної посадки проводиться на підставі розрахунку необхідних контактних тисків в сполученні. При цьому, з одного боку, контактний тиск має забезпечувати необхідну міцність з'єднання на зсув і обертання, а з іншого - не повинно перевищувати меж текучості матеріалів деталей, що з'єднуються.

Основним параметром, що забезпечує міцність сполучення на зсув та обертання, є величина контактної тиску. Мінімумально необхідний контактний тиск в сполученні визначають з умови перевищення силою тертя зсувних зусиль та зусиль, що крутять. Максимально допустимий питомий контактний тиск в з'єднанні, при якому відсутня пластична деформація на контактних поверхнях деталей, що з'єднуються, визначається по теорії найбільших дотичних напружень

Контактний тиск при відомій величині натягу прийнято визначати рішенням завдання Ляме і приймати постійним по всій довжині сполучення.

У переважній же більшості випадків охоплювана деталь довше той, що охоплює. При цьому розподіл контактної тиску по довжині з'єднання має більш складний характер, що залежить від лінійних розмірів деталей, їх форми, шорсткості поверхні, методу складання та ряду інших факторів, які формула Ляме не враховує. Деформація тієї частини валу, на яку посаджена деталь, що охоплює, по довжині сполучення нерівномірна. Виступаючі частини деталі, яку охоплюють, виходить за межі той, що охоплює, перешкоджають радіальному переміщенню суміжних перетинів, що призводить до концентрації напружень біля країв деталі, що охоплює. Таким чином, дійсний розподіл тисків по довжині з'єднання залишається невиявленим.

У статті поставлена та вирішена задача експериментально визначити фактичний контактний тиск в з'єднанні з гарантованим натягом і порівняти його з розрахунковим за загальноприйнятою методикою.

В результаті проведених досліджень було знайдено фактичне значення контактної тиску в з'єднанні з гарантованим натягом і наведені поправочні коефіцієнти залежно від способу складання з'єднувальних деталей.

Ключові слова: посадка з натягом, міцність сполучення, контактний тиск, формула Ляме, концентрація напружень, деталь, що охоплюється, деталь, що охоплює, пресова збірка, збірка з нагріванням.

Malickiy I., Smirnov I. «Contact pressures in connections with guaranteed interference fit».

In modern mechanical engineering, compound with a guaranteed preload are widely used, which do not require additional parts for their reliable connection. The selection of the required fit is made based on the calculation of the required contact pressures in conjunction. In this case, on the one hand, contact pressure should provide the required shear and rotation strength of the joint, and on the other hand, it should not exceed the yield strengths of the materials of the parts to be joined.

The main parameter ensuring the strength of the pair in shear and torsion is the magnitude of the contact pressure. The minimum required contact pressure in conjugation is determined from the condition that the frictional force exceeds the shear and cranking forces. The maximum allowable specific contact pressure in the joint, at which there is no plastic deformation on the contact surfaces of the parts to be joined, is determined by the theory of maximum shear stresses

Contact pressure at a known preload value is usually determined by solving the Lamé problem and taken constant over the entire length of the interface.

In the vast majority of cases, the shaft is longer than the sleeve. Moreover, the distribution of contact pressure along the length of the connection is more complex, depending on the linear dimensions of the mating parts, their shape, surface roughness, assembly method and a number of other factors that the Lamé formula does not take into account. The deformation of that part of the

shaft on which the sleeve is fitted is uneven along the mating length. The protruding parts of the shaft that extend beyond the edges of the sleeve prevent the radial movement of adjacent sections, which leads to a concentration of stresses at the edges of the enclosing part. Thus, the true pressure distribution along the length of the joint remains undetected.

The article poses and solves the problem of experimentally determining the actual contact pressures in compound with a guaranteed preload and comparing them with the values calculated by the generally accepted methodology.

As a result of the studies, the actual contact pressures in compound with a guaranteed preload were found and correction factors are given depending on the method of assembly of the connected parts.

Keywords: preload, contact strength, contact pressure, Lamé formula, stress concentration, shaft, sleeve, press assembly, assembly with heating.

Постановка проблемы.

В современном машиностроении широко применяются неподвижные соединения по посадке с гарантированным натягом, которые не требуют дополнительных деталей для их надежного соединения. Основным параметром, обеспечивающим прочность сопряжения, является величина контактного давления. Выбор необходимой посадки производится на основании расчета необходимых контактных давлений в сопряжении. При этом, с одной стороны, контактное давление должно обеспечивать требуемую прочность соединения на сдвиг и проворачивание, а с другой - не должно превышать пределов текучести материалов соединяемых деталей.

Анализ последних исследований.

Основным параметром, обеспечивающим прочность сопряжения на сдвиг и кручение, является величина контактного давления, что видно из формул (1) и (2)

$$F_{mp} = \pi d L p_k f, \quad (1)$$

$$M_{mp} = \frac{\pi d^2 L p_k f}{2}, \quad (2)$$

где F_{mp} - сила трения, Н; M_{mp} - момент трения, Нм; d - номинальный диаметр сопряжения, м; L - длина сопряжения, м; p_k - контактное давление, Па; f - коэффициент трения.

Минимально необходимое контактное давление p_k в сопряжении определяют по формулам, Па:

- при расчетах на осевой сдвиг

$$p_k \geq P_{oc} / \pi d L = F_{mp} / \pi d L f, \quad (3)$$

- при расчетах на скручивающий момент

$$p_k \geq 2 M_{кр} / \pi d^2 L = 2 M_{mp} / \pi d^2 L f, \quad (4)$$

- при расчетах на одновременное действие осевой силы и крутящего момента

$$p_k \geq \frac{1}{\pi d L} \sqrt{P_{oc}^2 + \frac{4 M_{кр}^2}{d^2}} = \frac{1}{\pi d L f} \sqrt{F_{mp}^2 + \frac{4 M_{mp}^2}{d^2}}, \quad (5)$$

где P_{oc} - осевая сила, действующая на соединение, кН;

$M_{кр}$ - крутящий момент, Нм.

Максимально допустимое удельное контактное давление в соединении, при котором отсутствует пластическая деформация на контактных поверхностях соединяемых деталей, определяется по теории наибольших касательных напряжений и не должно превышать меньшее из значений

$$p_{max1} = 0,58 \times \sigma_{T1} \sqrt{\frac{d_1}{d}} \sqrt{\frac{d_2}{d}} \quad p_{max2} = 0,58 \times \sigma_{T2} \sqrt{\frac{d_1}{d}} \sqrt{\frac{d_2}{d}}$$

где σ_{T1} , σ_{T2} – пределы текучести охватываемой и охватывающей детали соответственно, МПа, d_1 , d_2 – диаметральные размеры охватываемой и охватывающей детали (рис. 1), м.

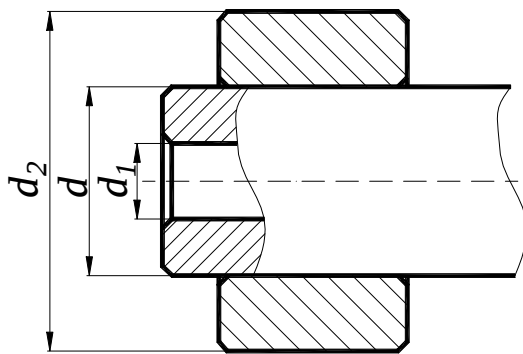


Рис. 1 – Схема соединения

Контактное давление при известной величине натяга принято определять решением задачи Ляме и принимать постоянным по всей длине сопряжения, Па:

$$p_k = \frac{d}{\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \frac{d}{\delta}}, \quad (6)$$

где δ – натяг, м;

E_1 , E_2 – модули упругости материала охватываемой и охватывающей детали соответственно;

C_1 , C_2 – коэффициенты жесткости охватываемой и охватывающей детали, определяются по формулам

$$C_1 = \frac{d^2 + d_1^2}{d^2 - d_1^2} \mu_1; \quad C_2 = \frac{d_2^2 + d^2}{d_2^2 - d^2} \mu_2, \quad (7)$$

где μ_1 , μ_2 – коэффициенты Пуассона охватываемой и охватывающей детали соответственно.

Таким образом, величина контактного давления определяется решением задачи Ляме и условно принимается постоянной по всей длине сопряжения.

В подавляющем же большинстве случаев охватываемая деталь длиннее охватывающей. При этом распределение контактного давления по длине соединения имеет более сложный характер, зависящий от линейных размеров сопрягаемых деталей, их формы, шероховатости поверхности, метода сборки и других факторов, которые формула Ляме не учитывает. Деформация той части вала, на которую посажена охватывающая деталь, по длине сопряжения неравномерна. Выступающие части охватываемой детали, выходящей за пределы охватывающей, препятствуют радиальному перемещению смежных сечений, что приводит к концентрации напряжений у краев охватывающей детали. Таким образом, истинное распре-

деление давлений по длине соединения остается не выявленным. Исследование контактного давления по длине сопряжения рассматривались в работах [3] и [4].

Цель статьи – экспериментально определить фактические контактные давления в соединении с гарантированным натягом, сравнить их с расчетными значениями и найти поправочные коэффициенты в зависимости от способа сборки соединяемых деталей.

Основной материал.

В качестве образцов для исследований служили детали: вал и втулка, изображенные на рис. 2. Втулка имеет продольные пазы для возможности приложения крутящего момента. Размеры сопряжения: диаметр - 49 мм, длина - 48 мм.

Экспериментальные исследования проводились по методу, предложенному Шатько И.И. [3], при котором контактное давление измерялось с помощью измерительного элемента - штыря (рис. 3, поз. 4) с наклеенными на него тензодатчиками (поз. 3). Штыри были вмонтированы в радиальные отверстия, просверленные в вале (поз 2) в трех сечениях, а провода от датчиков к мостовой схеме (поз. 5) монтировались в центральное отверстие, просверленное вдоль оси вала. Охватывающий элемент соединения (поз. 1) собирался с валом двумя различными способами: запрессовкой и тепловым методом.

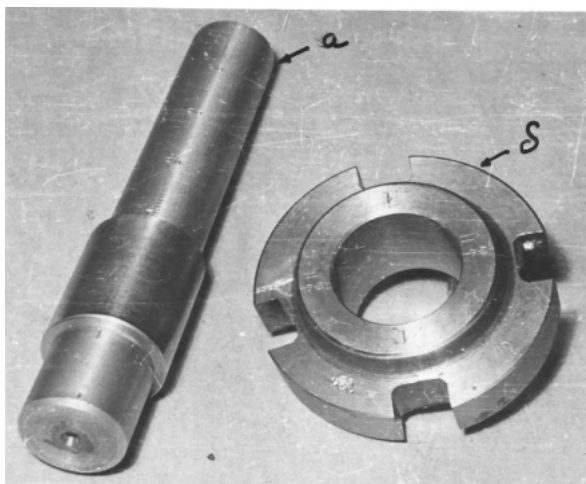


Рис. 2 – Образцы деталей для испытаний:
а - вал, б - втулка

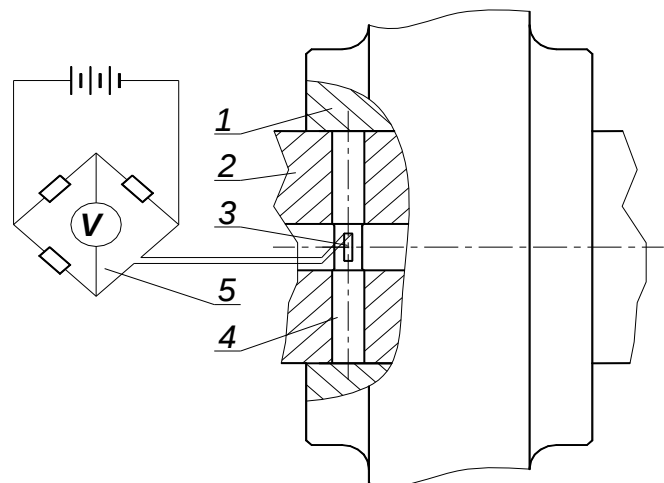


Рис. 3 – Схема измерения контактных давлений по методу Шатько И.И.

Были изготовлены образцы валов и втулок с номинальным диаметром сопряжения $d = 49$ мм и длиной сопряжения $L = 48$ мм с величинами натягов 22 мкм, 34 мкм, 40 мкм и 60 мкм. Образцы были собраны двумя методами: прессовым и с нагревом охватываемой детали. Контактное давление при данных натягах определялось теоретически по формуле (6), модули упругости принимались для стали $E_1 = E_2 = 2,01 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициенты Пуассона $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$. Коэффициенты жесткости соответственно охватываемой и охватывающей детали определялись по формулам (7): $C_1 = 0,7$ и $C_2 = 2,3$. Образцы были подвергнуты осевому сдвигу.

При полученной экспериментально величине усилия осевого сдвига $P_{сд}$ и расчетным по формуле (6) значением контактного давления p_k определялся коэффициент трения

$$f = \frac{P_{сл}}{pdLp_k} \quad (8)$$

Расчетные по формуле (6) и экспериментальные значения контактного давления в зависимости от натяга по сведены в таблицу 1. Там же приведены полученные по формуле (8) коэффициенты трения.

Таблица 1 – Теоретическое и экспериментальное контактное давление при различных способах сборки

Способ сборки	Усилие сдвига Р, кН	Натяг δ, мкм	Коэффициент трения, f	Контактное давление по Ляме (формула 6) p_k , МПа	Контактное давление экспериментальное, МПа
Термо-воздействием	120	22	0,515	31,4	39
	160	34	0,445	48,5	43,5
	185	40	0,425	57	68
	245	60	0,376	86	87,6
Прессовый	62,2	22	0,515	31,4	25,1
	90	34	0,445	48,5	36,3
	105	40	0,425	57	56,5
	125	60	0,376	86	73

Согласно экспериментальным данным контактное давление, полученное по формуле (6) при прессовой сборке примерно на 8-10% выше действительного, а при сборке с нагревом охватывающей детали, на 20-30% ниже (рис.4).

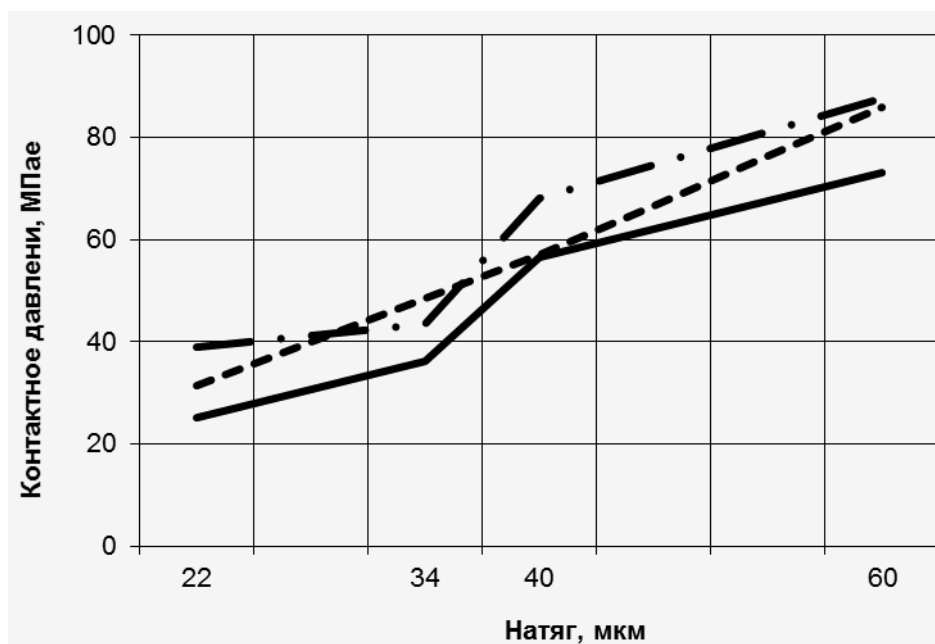


Рис. 4 – Теоретическое и экспериментальное контактное давление при различных способах сборки: пунктирная линия – по формуле (6), штрихпунктирная линия – при сборке с нагревом, сплошная линия – при прессовой сборке.

Вывод: Таким образом, можно утверждать, что формула Ляме не учитывает такие факторы как метод соединения с гарантированным натягом, коэффициент трения, который с увеличением контактного давления уменьшается, метод обработки сопрягаемых поверхностей. Для определения истинного значения контактного давления для сборки с термовоздействием в формулу Ляме нужно ввести коэффициент метода сборки К. При сборке с нагревом коэффициент К следует принимать К=1,2-1,3.

$$p_k = \frac{d}{\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}} K.$$

Список использованных источников:

1. Андреев Г. Я. Экспериментальный метод определения контактных напряжений в цилиндрических деталях сопряженных с натягом / Г. Я. Андреев, И. И. Шатко // Труды ХГИ. – 1962. – Т. 11 : Работы аспирантов. – С. 81-87.
2. Андреев Г. Я. Тепловая сборка в машиностроении / Г. Я. Андреев. – Киев : Техника, 1968. – 210 с.
3. Андреев Г. Я. Прочность тепловых соединений с антикоррозионной пленкой / Г. Я. Андреев, И. Ф. Малицкий // Техника. – 1968. – № 14. – С. 12.
4. Малицкий И. Ф. Влияние шероховатости и способов обработки на прочность сопряжения с натягом / И. Ф. Малицкий, Е. В. Чернятина // Машинобудування : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2014. – № 13. – С. 149-153.
5. Смирнов И. П. Развитие технологии ремонта подъемно-транспортного оборудования / И. П. Смирнов // Машинобудування : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2009. – № 4. – С. 170-177.
6. Смирнов И. П. Оптимальный размер диаметра соединений с натягом / И. П. Смирнов, И. Ф. Малицкий // Машинобудування : зб. наук. пр. – Харків : УПА, 2016. – № 18. – С. 139-144.
7. Андреев Г. Я. Тепловая сборка колесных пар / Г. Я. Андреев. – Харьков : Изд-во ХГУ, 1965. – 227 с.
8. Определение контактных давлений в соединении поллой оси со ступицей колеса / З. Г. Ткачук, И. Ф. Малицкий, А. А. Алехин [и др.] // Детали и узлы машин / З. Г. Ткачук. – Киев : Техника, 1975. – С. 54-59.

References

1. Andreev, GJa & Shatko, II 1962, 'Jeksperimentalnyj metod opredelenija kontaktnyh naprjazhenij v cilindricheskikh detaljah soprjazhennyh s natjagom', *Trudy Harkovskogo gornogo instituta*, vol. 11 Raboty aspirantov, pp. 81-87.
2. Andreev, GJa 1968, *Teplovaja sborka v mashinostroenii*, Tehnika, Kiev.
3. Andreev, GJa & Malickij, IF 1968, 'Prochnost teplovyh soedinenij s antikorrozionnoj plenkoj', *Tehnika*, no. 14, pp. 12.
4. Malickij, IF & Chernjatina, EV 2014, 'Vlijanie sherehovatosti i sposobov obrabotki na prochnost soprjazhenija s natjagom', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 13, pp. 149-153.
5. Smirnov, IP 2009, Razvitie tehnologii remonta podemno-transportnogo oborudovaniia, *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 4, pp. 170-177.
6. Smirnov, IP & Malickij IF 2016, 'Optimalnyj razmer diametra soedinenij s natjagom', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 18, pp. 139-144.
7. Andreev, GJa 1965, *Teplovaja sborka kolesnyh par*, Izdatelstvo Harkovskogo gosudarstvennogo universiteta, Harkov.
8. Tkachuk, ZG, Malickij, IF, Alehin, AA & Ostrenko, BC 1975, 'Opredelenie kontaktnyh davlenij v soedinenii poloj osi so stupicej kola', in Tkachuk, ZG, *Detali i uzly mashin*, Tehnika, Kiev, pp. 54-59.

Стаття надійшла до редакції 17 жовтня 2019 р

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-115-123

УДК 621.791.037

**ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ
ВИЗНАЧЕННІ ПОПЕРЕЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ МЕТАЛУ В ЗОНІ ШВА
ПРИ АРГОНОДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ АЛЮМІНІЮ МАРКИ АД0**

©Ситников Б.В., Маршуба В.П., Мірошніченко Н.М.,

Соловей Л.В., Широков Стефан

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про автора:

Ситников Борис Валентинович: ORCID: 0000-0003-2581-1486; sitnikovboris@outlook.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри зварювання; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Маршуба В'ячеслав Павлович: ORCID: 0000-0003-1426-6240; marshuba_vp@outlook.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри зварювання; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Мірошніченко Наталія Миколаївна: ORCID: 0000-0002-0561-4138; d_tasha@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.

Соловей Людмила Валентинівна: ORCID: 0000-0001-5308-6782; ludsol@ukr.net; ст. викладач кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.

Широков Стефан: ORCID: 0000-0002-6216-2908; fan.google@gmail.com; студент кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів; Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; вул. Кирпичова, м. Харків, 61002, Україна.

В роботі проведено експериментальне дослідження закономірностей зміни поперечних переміщень в зоні шва під час кристалізації при аргонодуговому зварюванні електродом, що не плавиться, алюмінію марки АД0. Отримані дані можуть бути використані при виборі оптимального режиму зварювання, безпечного з точки зору кристалізаційного розтріскування.

У статті розглядається доцільність використання статистичних методів аналізу точності, стабільності й керування ТП, що передбачає контроль процесу лише за одним показником якості виробу. Для безрозмірного показника якості розглянуто оцінки параметрів та знайдено числові характеристики цих моделей. На основі отриманих оцінок запропоновано метод визначення якості технологічних процесів у машинобудуванні.

Отримані результати свідчать про те, що при зварюванні пластин встик без зазору базова відстань в залежності від швидкості зварювання і температури попереднього підігріву, може зменшуватися, збільшуватися, або залишатися незмінною. Момент, коли починається зближення базових точок, становить найбільший інтерес з точки зору оцінки можливості утворення кристалізаційних тріщин у звареному шві. Умови, при яких зменшення базової відстані відбувається одночасно з протіканням кристалізації металу в уже згадуваному перетині є безпечними щодо утворення кристалізаційних тріщин, так як ослаблена ділянка шва піддається впливу, що стискає, від навколишнього металу, яке повністю або частково компенсує напруги розтягнення, які обумовлені складною усадкою. Якщо ж базова відстань залишається незмінною під час кристалізації, це свідчить про наявність напруги розтягування, яка обумовлена ускладненою усадкою. Це також створює небезпеку утворення кристалізаційних тріщин, оскільки напруги, як правило, концентруються в найбільш слабкій осевій ділянці шву, де метал твердне в останню чергу.

При зварюванні пластин з алюмінію марки АД0 товщиною 4 мм збільшення швидкості зварювання з 8 до 32 м/год призводить до появи напруг, що розтягують, в області перебування металу шву у твердорідкому стані, що може призводити до виникнення кристалізаційних тріщин.

Ключові слова: якість, технологічний процес, моделювання, числові характеристики, безрозмірний показник.

Ситников Б.В., Маршуба В.П., Мирошніченко Н.М., Соловей Л.В., Широков Стефан «Использование интегрированных технологий при определении поперечных деформациях металла в зоне шва при аргонодуговой сварке алюминия марки АД0».

В работе проведено экспериментальное исследование закономерностей изменения поперечных перемещений в зоне шва при кристаллизации при аргонодуговой сварке алюминия марки АД0 неплавящимся электродом. Полученные данные могут быть использованы при выборе оптимального режима сварки, безопасного с точки зрения кристаллизационного растрескивания.

В статье рассматривается целесообразность использования статистических методов анализа точности, стабильности и управления ТП, предусматривается контроль процесса лишь по одному показателю качества изделия. Для безразмерного показателя качества рассмотрены оценки параметров и найдены числовые характеристики этих моделей. На основе полученных оценок предложен метод определения качества технологических процессов в машиностроении.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при сварке пластин встык без зазора базовая расстояние в зависимости от скорости сварки и температуры предварительного подогрева, может уменьшаться, увеличиваться или оставаться неизменной. Момент, когда начинается сближение базовых точек, представляет наибольший интерес с точки зрения оценки возможности образования кристаллизационных трещин в сварном шве. Условия, при которых уменьшение базового расстояния происходит одновременно с протеканием кристаллизации металла в анализируемом сечении являются безопасными при создании кристаллизационных трещин, так как ослабленный участок шва подвергается сжимающему воздействию от окружающего металла, полностью или частично компенсирует напряжения растяжения, которые обусловлены сложной усадкой. Если же базовое расстояние остается неизменными во время кристаллизации, это свидетельствует о наличии напряжения растяжения, которая обусловлена осложненной усадкой. Это также создает опасность образования кристаллизационных трещин, так как напряжения, как правило, концентрируются в наиболее слабой осевой области шва, где металл затвердевает в последнюю очередь.

При сварке пластин из алюминия марки АД0 толщиной 4 мм увеличение скорости сварки с 8 до 32 м/ч приводит к появлению растягивающих напряжений, в области пребывания металла шва в твердожидком состоянии, что может приводить к возникновению кристаллизационных трещин.

Ключевые слова: качество, технологический процесс, моделирование, численные характеристики, безразмерный показатель.

Sitnikov B., Marshuba V., Miroshnichenko N., Solovey L., Shirokov Stefan «The use of integrated technologies for determining the transverse deformations of metal in the weld zone during argon-arc welding of aluminum grade AD0».

An experimental study of the patterns of changes in transverse displacements in the weld zone during crystallization during argon-arc welding of AD0 grade aluminum with a non-consumable electrode was carried out. The data obtained can be used to select the optimal welding mode, safe from the point of view of crystallization cracking.

The article discusses the feasibility of using statistical methods for analyzing the accuracy, stability and control of TP, provides for process control on only one indicator of product quality.

For a dimensionless quality indicator, parameter estimates are considered and numerical characteristics of these models are found. Based on the obtained estimates, a method for determining the quality of technological processes in mechanical engineering is proposed.

The results obtained indicate that when butt welding without a gap, the base distance, depending on the welding speed and preheating temperature, may decrease, increase or remain unchanged. The moment when the rapprochement of the base points begins is of greatest interest from the point of view of assessing the possibility of the formation of crystallization cracks in the weld. Conditions under which a decrease in the base distance occurs simultaneously with the crystallization of the metal in the analyzed section is safe when creating crystallization cracks, since the weakened section of the weld is subjected to compressive action from the surrounding metal, fully or partially compensates for tensile stresses, which are caused by complex shrinkage. If the base distance remains unchanged during crystallization, this indicates the presence of tensile stress, which is due to complicated shrinkage. This also creates the risk of crystallization cracks, since stresses are usually concentrated in the weakest axial region of the weld, where the metal hardens last.

When welding plates made of aluminum, grade AD0, 4 mm thick, an increase in the welding speed from 8 to 32 m/h leads to tensile stresses in the region where the weld metal is in a solid-liquid state, which can lead to crystallization cracks.

Keywords: argon, tungsten electrode, welding speed, aluminium, the seam, lateral movements, crystallization cracks.

1. Постановка проблеми в загальному вигляді

У процесі кристалізації твердодірного металу шва, що має мале відносне подовження, матеріал зазнає усадку і піддається впливу зварювальних деформацій [1]. У цей період навіть незначні напруги розтягнення можуть призвести до утворення кристалізаційних тріщин [2-4]. Основні закономірності виникнення деформацій і напружень при дуго-вому зварюванні алюмінієвих пластин, що розглянуті в роботах [5, 6]. На підставі експериментального дослідження закономірностей зміни зварювальних деформацій за допомогою методу муарових смуг був зроблений висновок про те, що для алюмінієвих сплавів характерним є поперечний стиск металу у зварювальній ванні [7]. Зі зростанням швидкості зварювання пік стиснення зсувається в бік більш низьких температур застигання. При цьому передбачалося [5, 6], що зварювальні напруги з'являються у ванні тільки після досягнення температури солідус. При температурі ж вище солідусу має відбуватися вільне переміщення металу в зварювальну ванну. Однак насправді напруги у зварному шві виникають під час перебування металу в твердодірному стані при температурах, що перевищують точку солідусу, тобто вони концентруються в найбільш слабкій ділянці [8].

З огляду на вищевикладене, можна зробити висновок, що для вибору оптимального режиму зварювання, безпечного з точки зору кристалізаційно-го розтріскування, необхідно вивчити закономірності поперечних деформацій металу шва під час перебування його в твердодірному стані.

2. Аналіз досліджень і публікацій по темі статті

Зварювальні напруги та деформації досліджували і продовжують вивчати велика кількість вітчизняних і зарубіжних вчених. Розглянемо лише деякі сторони даного питання, що

безпосередньо стосуються проблеми утворення гарячих тріщин з урахуванням вимог, щодо зварювання алюмінію. З цієї точки зору велике значення має динаміка тимчасових напруг і деформацій у зварному шві.

Розглядаючи температурне поле на поверхні металу навколо джерела тепла, що переміщається, автор роботи [9] приходить до висновку про те, що в результаті підвищення температури смуги металу близько осі шва збільшуються по довжині більше, ніж паралельні смуги, що розташовані на крайках далі від осі. Внаслідок цього пластини, що зварюються, прагнуть зігнутися з утворенням зазору попереду і ззаду джерела теплоти, а безпосередньо попереду ванни завжди створюється область високих напруг та стиснення.

Наявність області напруг, що стискають або деформацій попереду зварювальної ванни, що рухається, природно, та не є небезпечною, так як тут метал плавиться, а не твердне. Картина напруг і деформацій при зварюванні в хвостовій частині шва, залежить від режиму зварювання, особливо від швидкості процесу, наявності зазору або оброблення, властивостей металу, товщини і ширини пластин, жорсткості кріплення тощо. У нормальних умовах хвостову частину ванни охоплюють зварювальні напруги, що стискають. Тут їм протистоять усадочні напруги перехідної зони, що розтягують. З точки зору запобігання гарячих тріщин поява зварювальних напружень, що стискають, корисна.

В роботі [10] розглянуто вплив режиму зварювання на технологічну міцність швів алюмінієвих сплавів. Відзначено, що вплив швидкості зварювання на стійкість металу шва до утворення кристалізаційних тріщин не завжди однозначно. Так, крім швидкості, необхідно враховувати також і форму провару, напрямок росту кристалів та ін.

При зварюванні стикових швів пластин або полотнищ автори роботи [9] спостерігали наступну картину. Якщо шов варити з неповним (на глибину менш 2/3 товщини листа) проплавленням листа (товщиною більше 3...5 мм) схильного до утворення тріщин сплаву, поздовжні тріщини не виявляються. Зазвичай при цьому можливо утворення поперечних тріщин. При однопрохідному зварюванні стикових швів з повним проваром форма шва менш сприятлива і зростає небезпека утворення поздовжніх тріщин. У разі зварювання без попереднього і супутнього підігріву з відносно великою швидкістю в основному відбувається зближення крайок. Якщо зварювати пластини з малою швидкістю, то в процесі зварювання метал встигає охолонути настільки, що останні ділянки шва відчувають напруги розтягнення.

У ряді досліджень вивчалася деформація металу шву в процесі утворення тріщин при зварюванні з одночасним записом значень температури. При вимірюванні температури металу в процесі зварювання, який характеризується неоднорідним температурним полем з великим градієнтом температур, найбільшого поширення набули термопари. З числа існуючих термопар, що зазвичай використовують для виміру температур в діапазоні 300...700° С, в роботі [11] була обрана хромель-алюмелева термопара. Дана термопара поряд з лінійною термоелектричної характеристикою при досить високій ЕРС відрізняється в досліджуваному діапазоні температур незначною розчинністю в рідкому алюмінії. Ця характеристика дуже ва-

жлива для використання термопар без захисного чохла з метою зниження її інерційності. Така термопара, виготовлена з дроту діаметром 0,10...0,15 мм, набирає температуру 300° С за час, що не перевищує 0,5 с. Для збереження стабільним опору вимірювального контуру застосовувалися ковзаючі контакти. Істотний вплив на точність вимірювання надає спосіб введення спая термопар в рідкий метал. Термопару діаметром менше 0,8 мм через теплову дію дуги не вдається вводити в зварювальну ванну зверху. Більш зручним виявилось введення спая термопар в зварювальну ванну знизу (отвір діаметром 0,6 мм). При цьому виявилось необхідним вводити спай термопар на таку глибину, щоб в процесі зварювання він не виступав над рівнем рідкого металу, який покриває дно зварювальної ванни. При більшому діаметрі отвору або невеликій глибині занурення, спай термопар погано змочується рідким металом. Потім кінці термопар підключалися через опір до гальванометра або осцилографа.

Для вимірювання деформації був сконструйований деформометр [9]. Наявність між ніжками деформометра двох пружин, що взаємно врівноважують, одна одну дозволяє знизити до мінімуму тиск голок деформометра на метал, що кристалізується. У момент утворення зростаючих кристалів жорсткого каркаса, тиск голок практично дорівнює нулю. Воно збільшується в процесі кристалізації в міру зростання абсолютної величини деформацій. Завдяки одночасному збільшенню цих зусиль і міцності металу, що кристалізується, верхню температурну межу вимірювань приладу вдалося підняти істотно вище температури солідусу. Переміщення голок деформометра перетворюється в електричний сигнал за допомогою тензоопорів. Вступний сигнал від тензодатчика записується на осцилографі одночасно з ЕРС термопар. Це забезпечує автоматичну синхронізацію записи деформацій і температур у часі.

Оригінальну методику вимірювання переміщень зварювальних кромок при затвердінні металу застосували автори роботи [12]. Вони відмовилися від використання деформометра з ніжками, що заморожують в тілі шву, вважаючи, що тиск, який вони створюють, дорівнює опору металу в інтервалі крихкості. Для визначення деформацій застосували кінозйомку взаємного положення контрольних точок бази, що вимірювали, в процесі проходження через неї зварної дуги. При кінозйомки фіксували ризики, що перехрещуються, які нанесені на ті ділянки крайок, що з'єднуються, які не повинні оплавлятися. Складові зразки зварювалися круговими швами при нерухомому пальнику і кінокамери.

3. Виклад основного матеріалу

Переміщення зварювальних кромок шву при затвердінні металу проводили безконтактним методом за методикою, яка наведена в роботі [12]. Автори відмовилися від використання деформометра з ніжками, що замороженими в тілі шва, вважаючи, що тиск, який вони створюють, дорівнює з опору металу в інтервалі крихкості. Для визначення деформацій застосували кінозйомку взаємного положення перехрещуються ризик вимірювальної бази в процесі проходження через неї дуги (рис. 1).

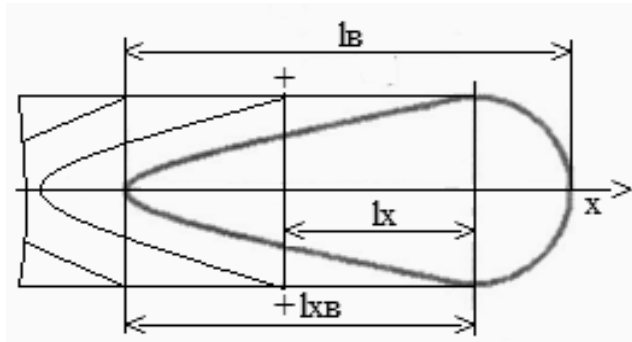


Рис. 1 – Схема зварювальної ванни:

l_b – довжина зварювальної ванни; l_{xb} – довжина хвостової частини зварювальної ванни; + – перехрещуються ризики; l_x – проміжне положення рисок, що перехрещуються

При зварюванні використовували пальник з прозорою кришкою, що дозволяє спостерігати і фіксувати на кіноплівці зміни бази між контрольними відмітками, попередньо нанесеними зліва і праворуч від осі шва. Кінозйомку виробляли зі швидкістю 8...24 кадрів в секунду. Після проявлення плівки відстань між відмітками кожної бази вимірювали за допомогою інструментального мікроскопа.

Для зменшення похибки використовували базу 14...16 мм, при якій похибка становила не більше 0,2 %. В експериментах використовували пластини розмірами 200x150 мм завтовшки 4 мм. Зварювання проводили вольфрамовим електродом марки ЕВЛ діаметром 4 мм на змінному струмі від джерела живлення ТІР-300Д з використанням присадного дроту СвА5 діаметром 2 мм на режимах, зазначених у таблиці. Пристрій для кріплення і підігріву пластин складався з експериментальної нагрівальної електричної плити, на яку містився столик зі зразком, що досліджували. Зразки підігрівали до заданої температури T_p , потім відключали пристрій, що нагріває та починали процес зварювання.

На рис. 2 представлені результати вимірювань відносних переміщень d , у %, кромek, що зварюють, в поперечному напрямку при зварюванні пластин з алюмінію марки АД0 зі швидкістю 8, 16, 24 і 32 м/год. Початок вимірювань відносних переміщень відповідає моменту проходження дуги через переріз, що аналізують, кінець – моменту завершення кристалізації зварювальної ванни (табл.).

Отримані результати свідчать про те, що при зварюванні пластин встик без зазору в міру віддалення дуги від перерізу, що аналізують, базова відстань в залежності від швидкості зварювання і температури попереднього підігріву, може зменшуватися, збільшуватися, або залишатися незмінною. Момент, коли починається зближення базових точок, становить найбільший інтерес з точки зору оцінки можливості утворення кристалізаційних тріщин у звареному шві [9]. Умови, при яких зменшення базової відстані відбувається одночасно з протіканням кристалізації металу в уже згадуваному перетині є безпечними щодо утворення кристалізаційних тріщин, так як ослаблена ділянка шва піддається впливу, що стискає, від навколишнього металу, яке повністю або частково компенсує напруги розтягнення, які обумовлені складною усадкою. Якщо ж базова відстань залишається незмінними під час кристалізації, це свідчить про наявність напруги розтягування, яка обумовлена ускладненою усадкою. Це також створює небезпеку утворення кристалізаційних тріщин, оскільки напруги, як правило, концентруються в найбільш слабкій осевій ділянці шву, де метал твердне в останню чергу.

Таблиця. - Орієнтовні режими автоматичної аргонодугового зварювання неплавким електродом стикових з'єднань алюмінію марки АД0 товщиною 4 мм

№ опыта	Iзв, А	Vзв., м/год	Vп.п., м/год	Tп., ° С
1	190	8	22	20
2	220	16	27	20
3	260	24	32	20
4	320	32	38	20
5	170	8	22	100
6	200	16	27	100
7	240	24	32	100
8	300	32	38	100
9	160	8	22	150
10	190	16	27	150
11	230	24	32	150
12	290	32	38	150
13	150	8	22	200
14	180	16	27	200
15	220	24	32	200
16	280	32	38	200

Однак схильність до утворення тріщин, пов'язана з деформаціями металу шву, які зумовлені впливом навколишнього металу та залежить і від інших чинників: протяжності температурного інтервалу крихкості, щодо відповідного подовження в цьому інтервалі, темпу наростання деформацій розтягування. Тому постійний обсяг вимірюваної бази в інтервалі кристалізації не є фактором, який неминуче призводить до утворення кристалізаційних тріщин – він тільки свідчить про тенденцію зростання небезпеки розтріскування. Залежності, що отримані при дослідженні зварювання пластин алюмінію зі швидкістю 8 м/год (рис. 2, а), свідчить про наявність деформацій стиснення в період перебування металу шва в твердорідкому стані, як при підігріві зразків, так і без нього. У разі збільшення швидкості зварювання до 16 м/год, твердіє метал шву при зварюванні пластин без підігріву, який спочатку піддавався впливу деформацій стиснення, а потім розтягування (рис. 2, б), що сприяє зниженню стійкості з'єднання, що зварюють, проти утворення кристалізаційних тріщин. Підігрів зразків при цій швидкості зварювання до 100° С і вище сприяє усуненню напруг, що розтягують в області перебування металу шва в твердорідкому стані. Подальше збільшення швидкості зварювання до 24 м/год призводить до того, що підігрів зразків до 100° С з метою усунення напруг, що розтягують, виявляється недостатнім (рис. 2, в). Наявність деформацій стиснення в період перебування металу шву в твердорідкому стані досягається при підігріві пластин до 150 і 200° С. Зі збільшенням швидкості зварювання до 32 м/год, що дозволяє забезпечити деформації стиснення в металі шва, що кристалізується, яке можливо лише при підігріві пластин до 200° С (рис. 2, г).

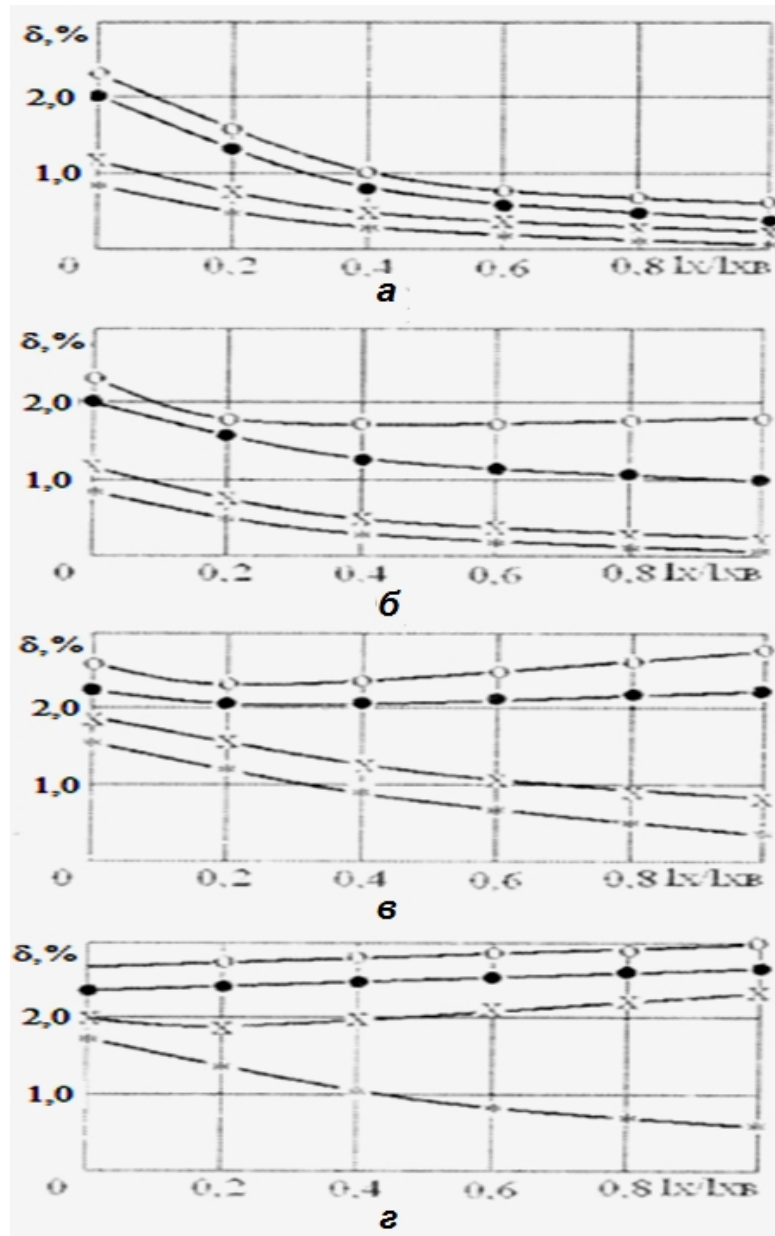


Рис 2. Відносні переміщення кромки, що зварюють в поперечному напрямку при:
а – $V_{св} = 8$ м/год; б – $V_{св} = 16$ м/год; в – $V_{св} = 24$ м/год; г – $V_{св} = 32$ м/год;
о-о – $T_p = 20^\circ C$; ●-● – $T_p = 100^\circ C$; х-х – $T_p = 150^\circ C$; *-* – $T_p = 200^\circ C$

Висновки

При зварюванні пластин з алюмінію марки АД0 завтовшки 4 мм збільшення швидкості зварювання з 8 до 32 м/год призводить до появи напруг, що розтягують, в області перебування металу шву у твердорідкому стані, що може призводити до виникнення кристалізаційних тріщин. При зварюванні без підігріву виникнення кристалізаційних тріщин найменш ймовірно при $V_{св} = 8$ м/год. Попередній підігрів пластин алюмінію марки АД0 завтовшки 4 мм сприяє усуненню напруг, що розтягують, в області перебування металу шву у твердорідкому стані і, як наслідок, підвищенню стійкості зварного з'єднання проти утворення кристалізаційних тріщин. Отримані результати можуть бути використані для вибору оптимальних режимів зварювання алюмінію марки АД0, яке безпечне з точки зору кристалізаційного розтріскування.

Список использованных источников:

1. Жданов И. М. О деформациях металла шва в процессе кристаллизации при автоматической сварке / И. М. Жданов // Сварочное производство. – 1992. – №4. – С. 26-28.
2. Borland I. C. Fundamentals of solidification cracking in welds. Part 1 / I. C. Borland // Welding and Metal Fabrication. – 1989. – No. 1. – Pp. 19-29.
3. Borland I. C. Fundamentals of solidification cracking in welds. Part 2 / I. C. Borland // Welding and Metal Fabrication. – 1999. – No 3. – Pp. 99-107.
4. Matsuda F. Moving characteristics of weld edges during solidification in relation to solidification cracking in GTA weld of aluminium alloy thin sheet / F. Matsuda, K. Nakata, S. Harada // Trans. IWRI. – 1990. – Vol. 9, No 2. – Pp. 83-93.
5. Chichoski R. A. The character of stress fields around a weld arc moving on aluminium sheet / R. A. Chichoski // Welding Journal. – 1992. – Vol. 51, No 1. – Pp. 9-18.
6. Chichoski R. A. Understanding weld cracking in aluminium sheet / R. A. Chichoski // Welding Journal. – 2016. – no.4. – Pp. 24-30.
7. Chichoski R. A. Expansion and stress around aluminium weld puddles / R. A. Chichoski // Welding Journal. – 1989. – Vol. 58, No 9. – Pp. 263-267.
8. Семенюк Н. И. Анализ изменения поперечных деформаций металла в зоне шва при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов / Н. И. Семенюк, Д. М. Рабкин // Автоматическая сварка. – 1990. – № 9. – С. 19-22.
9. Рабкин Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов / Д. М. Рабкин. – Киев : Наук. думка, 1996. – 256 с.
10. Якушин Б. Ф. Влияние режима сварки на технологическую прочность алюминиевых сплавов / Б. Ф. Якушин, Д. М. Чернавский // Сварочное производство. – 1992. – № 11. – С. 1-3.
11. Рабкин Д. М. Влияние эффективного интервала кристаллизации на склонность алюминиевых сплавов к образованию горячих трещин при сварке / Д. М. Рабкин, В. Г. Игнатьев, И. В. Довбищенко // Автоматическая сварка. – 1994. – № 4. – С. 13-14.
12. Чернавский Д. М. Измерение перемещений свариваемых кромок при затвердевании металла шва / Д. М. Чернавский, Б. Ф. Якушин // Автоматическая сварка. – 1993. – № 2. – С. 36-40.

References

1. Zhdanov, IM 1992, 'O deformacijah metalla shva v processe kristallizacii pri avtomaticheskoi svarke', *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 4, pp. 26-28.
2. Borland, IC 1989, 'Fundamentals of solidification cracking in welds. Part 1', *Welding and Metal Fabrication*, no. 1, pp. 19-29.
3. Borland, IC 1999, 'Fundamentals of solidification cracking in welds. Part 2', *Welding and Metal Fabrication*, no 3, pp. 99-107.
4. Matsuda, F, Nakata, K & Harada, S 1990, 'Moving characteristics of weld edges during solidification in relation to solidification cracking in GTA weld of aluminium alloy thin sheet', *Trans. IWRI*, vol. 9, no 2, pp. 83-93.
5. Chichoski, RA 1992, 'The character of stress fields around a weld arc moving on aluminium sheet', *Welding Journal*, vol. 51, no 1, pp. 9-18.
6. Chichoski, RA 2016, 'The character of stress fields around a weld arc moving on aluminium sheet', *Welding Journal*, no. 4, pp. 24-30.
7. Chichoski, RA 1989, 'Understanding weld cracking in aluminium sheet', *Welding Journal*, vol. 58, no 9, pp. 263-267.
8. Semenjuk, NI & Rabkin, DM 1990, 'Analiz izmenenija poperechnyh deformacij metalla v zone shva pri argonodugovoi svarke aljuminievyh splavov', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 9, pp. 19-22.
9. Rabkin, DM 1996, *Metallurgija svarki plavleniem aljuminija i ego splavov*, Naukova dumka, Kiev.
10. Jakushin, BF & Chernavskij, DM 1992, 'Vlijanie rezhima svarki na tehnologicheskiju prochnost aljuminievyh splavov', *Svarochnoe proizvodstvo*, no. 11, pp. 1-3.
11. Rabkin, DM, Ignatev, VG & Dovbishhenko, IV 1994, 'Vlijanie jeffektivnogo intervala kristallizavcii na sklonnost aljuminievyh splavov k obrazovaniju gorjachih treshhin pri svarke', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 4, pp. 13-14.
12. Chernavskij, DM & Jakushin, BF 1993, 'Izmerenie peremeshhenij svarivaemyh kromok pri zatverdevanii metalla shva', *Avtomaticheskaja svarka*, no. 2, pp. 36-40.

Стаття надійшла до редакції 19 жовтня 2019 р.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЖЕСТКОГО ФУНДА-МЕНТА НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА ВЗРЫВА

©Фролов Е.А.¹, Коробко Б.О.¹, Агарков В.В.², Дерябкина Е.С.³

Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка¹

Державне підприємство "Харківстандартметрологія"²

Українська інженерно-педагогічна академія³

Информация об авторах:

Фролов Євгеній Андрійович: ORCID 0000-0002-9415-1066, naumova_olga1@gmail.com, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, 36011, м. Полтава, Україна.

Коробко Богдан Олегович: ORCID 0000-0001-5319-6615, natavereh@ukr.net, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, 36011, м. Полтава, Україна.

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

Дерябкина Євгенія Станіславівна: ORCID: ORCID 0000-0002-5531-0124, 216464@mail.ru, кандидат технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій в машинобудуванні і зварювального виробництва, Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Целью исследований было создание надежных методов расчета фундаментов, обеспечивающих безопасную работу установок штамповки деталей с использованием ударно-импульсного нагружения (электрогидравлический удар, взрыв, пневмо и статико динамический удар). Для расчета рассматриваем фундамент расположенный на поверхности упругого основания и нагруженный асимметричной нагрузкой $P(r,t)$. Считая фундамент жестким, получено дифференциальное уравнение движения фундамента без учета колебаний. Далее предполагаем, что горизонтальное перемещение отсутствует, то это допущение и асимметричный характер задачи позволяет использовать вариационный метод решения. Это позволяет записать дифференциальное уравнение, тогда колебательное движение упругого основания под нагрузкой равно величине реакции грунта, расположенного под фундаментом. Полученное уравнение описывает движение упругого элемента за пределами основания и позволяет учесть влияние упругих и инерционных сил грунта в этой области на параметры движения фундамента.

Предполагается, что форма колебаний упругого основания соответствует статической осадке. Получено общее решение уравнения колебаний в виде модифицированной функции Бесселя. Выполнив необходимые преобразования, получим, что под действием мгновенного импульса, жесткий фундамент на упругом основании совершает гармонические колебания с круговой частотой. Для вычисления коэффициентов необходимо знать характер перемещения по глубине основания. Полученные в статье выражения для определения частоты свободных колебаний жесткого фундамента на упругом основании под действием импульсного нагружения позволяет решать целый ряд задач по выбору режимов фундаментов технологических установок ударно-импульсного нагружения, осуществляемого энергией взрыва в гидросреде.

Ключевые слова: ударно-импульсное нагружение, расчет, движение, мгновенный импульс, частота колебаний жесткого фундамента.

Фролов Є.А., Коробко Б.О., Агарков В.В., Дерябкина Є.С. «Визначення частоти вільних коливань жорсткого фундаменту на пружній основі під дією імпульса вибуху»

Метою досліджень було створення надійних методів розрахунку фундаментів, що забезпечують безпечну роботу установок штампування деталей з використанням ударно-імпульсного навантаження (електрогідравлічний удар, вибухове навантаження, пневмо і статико динамічний удар). Для розрахунку розглядаємо фундамент розташований на поверхні пружної основи і навантажений асиметричним навантаженням $P(r, t)$. Вважаючи фундамент жорстким, отримано диференціальне рівняння руху фундаменту без урахування коливань. Далі припускаємо, що горизонтальне переміщення відсутнє, то це допущення та асиметричний характер завдання дозволяє використати варіаційний метод рішення. Це дозволяє записати диференціальне рівняння, тоді коливальний рух пружної основи під навантаженням дорівнює величині реакції ґрунту, розташованого під фундаментом. Отримане рівняння описує рух пружного елемента за межами основи і дозволяє врахувати вплив пружних і інерційних сил ґрунту в цій області на параметри руху фундаменту. Передбачається, що форма коливань пружної основи відповідає статичному осіданню. Отримано загальне рішення. Отримані в статті вирази для визначення частоти вільних коливань жорсткого фундаменту на пружній основі під дією імпульсного навантаження дозволяє вирішувати цілий ряд завдань по вибору режимів фундаментів технологічних установок ударно -імпульсного навантаження, здійснюваного енергією вибуху у гідросередовищі.

Ключові слова: ударно-імпульсне навантаження, розрахунок, рух, миттєвий імпульс, частота коливань жорсткого фундаменту.

Frolov E., Korobko B., Agarkov V., Deryabkina E. «Determination of frequency of free vibrations of hard foundation on the resilient founding under the action of impulse of explosion».

The aim of the research was to create reliable methods for calculating foundations that ensure the safe operation of stamping parts using shock-impulse loading (electro-hydraulic shock, explosive loading, pneumatic and static-dynamic shock). For calculation, we consider a foundation located on the surface of an elastic base and loaded with an asymmetric load $P(r, t)$. Considering the foundation to be rigid, a differential equation for the movement of the foundation without vibrations is obtained. Further, we assume that there is no horizontal displacement, then this assumption and the asymmetric nature of the problem make it possible to use the variational solution method. This allows you to write a differential equation, then the oscillatory motion of the elastic base under load is equal to the magnitude of the reaction of the soil located under the foundation. The obtained equation describes the movement of the elastic element outside the base and allows you to take into account the influence of the elastic and inertial forces of the soil in this area on the parameters of the movement of the foundation.

It is assumed that the vibrational shape of the elastic base corresponds to a static draft. A general solution of the oscillation equation is obtained in the form of a modified Bessel function. Having completed the necessary transformations, we find that under the action of an instantaneous impulse, a rigid foundation on an elastic base performs harmonic oscillations with a circular frequency. To calculate the coefficients, you must know the nature of the movement along the depth of the base. The expressions obtained in the article for determining the frequency of free vibrations of a rigid foundation on an elastic foundation under the influence of pulsed loading allow us to solve a number of problems in choosing the modes of foundations of technological installations for shock-pulse loading carried out by the explosion energy in a hydraulic medium.

Keywords: impulse loading, calculation, motion, instantaneous impulse, oscillation frequency of a rigid foundation.

1. Введение.

Штамповка листовых деталей сложной конфигурации из труднодеформируемых и малопластичных материалов представляет собой сложный процесс, требующий применение специального энергоемкого оборудования. Широкое распространение в промышленности

способов изготовления деталей с помощью ударно-импульсных источников энергии повлекло за собой создание для этих целей различных технологических процессов и установок (электрогидравлическая, взрывная, пневмоударная, статико-динамическая штамповка). Неотъемлемой частью любой такой установки является фундамент, предназначенный для размещения на нем технологической оснастки и передающей среды, а также для предотвращения сейсмического воздействия импульсной нагрузки на окружающее цеховое оборудование.

2. Постановка проблемы.

Постепенное вытеснение существующего кузнечно-прессового оборудования (импульсной, пневмоударной и статико-динамической штамповки), а также стремление поставить высокоскоростные способы обработки металлов [1-3] на технологический поток требуют создания надежных методов расчета фундаментов, обеспечивающих безопасную работу установок в цехе и достаточную их долговечность. Вместе с тем необходимо искать пути снижения веса фундаментов с целью уменьшения стоимости технологической установки, оборудования.

Для решения этих вопросов необходимо знать параметры движения фундаментов под действием ударно-импульсной нагрузки и их частоту свободных колебаний, существующие методики не учитывают специфику ударно-импульсного нагружения в такого вида установок [4].

Целью данного исследования является определение частотных колебаний фундаментов на упругом основании под действием ударно-импульсного нагружения.

3. Основной материал.

Рассмотрим круглый в плане фундамент радиуса R , расположенный на поверхности упругого основания и нагруженный асимметричной внешней нагрузкой $P(r, t)$,

Считая фундамент жестким, запишем в цилиндрической системе координат дифференциальное уравнение движения фундамента без учета затухания колебаний:

$$M \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + Q(t) = P(t), \quad (1)$$

где M – масса фундамента; $Q(t)$ – суммарная сила реакции упругого основания; $P(t)$ – суммарная внешняя, нагрузка на фундамент.

Реакции упругого основания найдем при следующем упрощающем предположении: горизонтальные перемещения грунта отсутствуют или малы настолько, что ими можно пренебречь. Учитывая это допущение, а также асимметричный характер задачи, можно, используя вариационный метод [5], представить искомые перемещения фундамента в виде

$$\begin{aligned} U(r, \varphi, z, t) &= 0 \\ V(r, \varphi, z, t) &= 0 \\ W(r, \varphi, z, t) &= W(r, t) \varphi(z) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь U , V , W – составляющие перемещения в направлении координат r , θ , z - соответственно, $\psi(z)$ – функция, характеризующая безопасную работу распределение перемещений по высоте основания, выбираемая заранее в соответствии с физическими условиями задачи.

При условии (2) выбираем функцию $\psi(z)$ так, чтобы $\psi(z)=1$, и рассмотрим равновесие элемента упругого основания с учетом инерционных сил. Тогда дифференциальное уравнение движения упругого основания запишется следующим образом:

$$2m\ddot{e}\frac{\partial^2 W(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial W(r,t)}{\partial r}\dot{U} - lW(r,t) - m_1\frac{\partial^2 W(r,t)}{\partial t^2} + q(r,t) = 0, \quad (3)$$

Коэффициенты данного уравнения имеют вид:

$$m = \frac{E_0 r_{11}}{4(1+n_0)}; \quad l = \frac{E_0 s_{11}}{1-n_0}; \quad m_1 = r_{11}, \quad (4)$$

где:

$$r_{11} = \int_{(H)} \partial y^2(z) dz,$$

$$s_{11} = \int_{(H)} \partial y^2(z) dz,$$

ρ – плотность грунта,

$$E_0 = \frac{E}{1-n^2} - \text{приведенный модуль упругости грунта,}$$

$$n_0 = \frac{n}{1-n} - \text{приведенный коэффициент Пуассона грунта.}$$

Дифференциальное уравнение (3) описывает колебательное движение упругого основания под нагрузкой $q(r, t)$, равной по величине реакции грунта, расположенного под фундаментом. Поскольку фундамент имеет конечные размеры, то в упругом основании следует рассматривать две области (рис. 1), колебания которых описываются уравнениями:

при $0 \leq r \leq R$

$$\frac{\partial^2 W_1(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial W_1(r,t)}{\partial r} - a^2 W_2(r,t) = \frac{m_1}{2m}\frac{\partial^2 W_1(r,t)}{\partial t^2} + \frac{l(r,t)}{2m} = 0, \quad (5)$$

при $0 \leq r \leq \infty$

$$\frac{\partial^2 W_2(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial W_2(r,t)}{\partial r} - a W_2(r,t) = \frac{m_1}{2m}\frac{\partial^2 W_2(r,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (6)$$

где R – радиус фундамента; $a^2 = l/2m$.

Поскольку фундамент принят жестким, то из условия совместности перемещения фундамента и упругого основания (рис.1) можно для области $0 \leq r \leq R$ получить искомые перемещения фундамента:

$$W_1 = CT(t), \quad (7)$$

где C – постоянная; $T(t)$ – функция, зависящая только от времени.

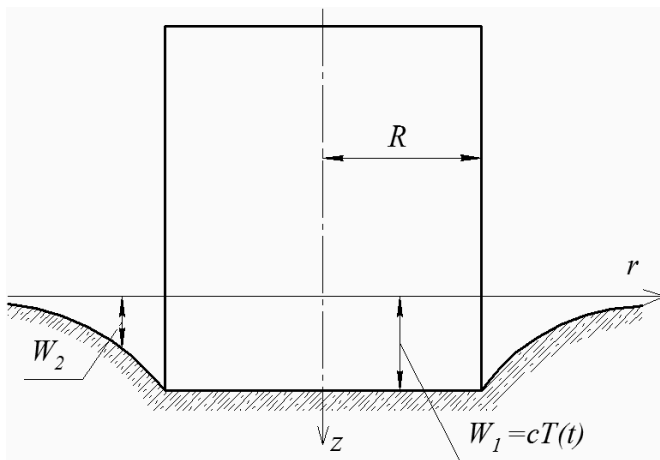


Рис. 1.- Области упругого основания.

Для нахождения перемещений $W_2(r, t)$ представим их в виде произведения двух функций, из которых одна зависит только от координаты r , а другая – только от времени t

$$W_2(r, t) = F_2(r)T(t), \quad (8)$$

При этом уравнение (6) после разделения переменных запишется в виде

$$\frac{d^2 F_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d F_2}{dr} - a^2 F_2 = \frac{m_1}{2m} \frac{T''}{T}, \quad (9)$$

Полученное уравнение описывает движение упругого основания за пределами фундамента и позволяет учесть влияние упругих и инерционных сил грунта в этой области на параметры движения фундамента.

Предполагая, что форма колебаний упругого основания соответствует форме статической осадки, получим для определения функции $\Phi_2(r)$ однородное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 F_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d F_2}{dr} - a^2 F_2 = 0 \quad (10)$$

Исходя из физического содержания задачи, граничные условия **зададим** в следующем виде: при $r \rightarrow \infty$ $W_2 = 0$

$$\text{при } r = R \quad W_2 = W_1 \quad (11)$$

Общее решение уравнения (10) может быть представлено через модифицированные функции Бесселя:

$$F_2(r) = C_1 J_0(ar) + C_2 K_0(ar) \quad (12)$$

Используя граничные условия (10) и учитывая выражение (8) получим:

$$W_2 = \frac{CT(t)}{K_0(aR)} K_0(ar), \quad (13)$$

причем $0 \leq r \leq \infty$.

Реактивные силы упругого основания в области $0 \leq r \leq R$ определяются из уравнения (4), которое при зависимости (7) примет вид:

$$q(t) = l CT(t) + m_1 CT(t) \quad (14)$$

Полная реактивная сила упругого основания, расположенного непосредственно под фундаментом:

$$Q_R(t) = \int_0^{2p} \int_0^R \ddot{q}(t)r) dr dq = p R^2 C [I T(t) + m_1 T(t)] \quad (15)$$

Кроме силы $Q_R(t)$ на фундамент действуют фиктивные реакции, распределенные по контуру подошвы фундамента [1]. Для их определения необходимо подсчитать работу нормальных и касательных напряжений, а также работу инерционных сил упругого основания, расположенного за пределами фундамента. При этом за возможное единичное перемещение здесь нужно принять перемещение:

$$\bar{W}_0 = 1 \frac{K_0(aR)}{K_0(aR)}. \quad (16)$$

Тогда суммарная реактивная сила упругого основания, расположенного, в области $R \leq r \leq \infty$, определится выражением:

$$Q_\phi(t) = 1 \int_0^{2p} \int_0^R \int_0^\infty \tau_{zr} \frac{\partial \bar{W}_0}{\partial r} + s_{zz} \frac{\partial \bar{W}_0}{\partial z} + r \frac{\partial^2 \bar{W}_0}{\partial t^2} \bar{W}_0 dr dq dz, \quad (17)$$

где τ_{zr} , σ_{zz} – соответственно касательные и нормальные напряжения, возникающие в упругом основании.

Выполнив необходимые преобразования, получим:

$$Q_\phi(t) = p R^2 C \int_0^{2p} \int_0^R \int_0^\infty \frac{K_1(aR)}{a R K_0(aR)} T(t) + m_1 \frac{K_1^2(aR)}{K_0^2(aR)} - \frac{\ddot{q}(t)}{\bar{W}_0} \bar{W}_0 dr dq dz, \quad (18)$$

где $K_1(aR)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка.

Подставляя выражения (15) и (18) в уравнение (1) и используя формулу (7), после несложных преобразований получим, для свободных колебаний фундамента следующее уравнение:

$$I + 2I \frac{K_1(aR)}{a R K_0(aR)} T(t) = 0, \quad (19)$$

где m_0 масса единицы поверхности фундамента.

Под действием мгновенного импульса жесткий фундамент на упругом основании совершает простые гармонические колебания с круговой частотой, определяемой выражением

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1 + 2 \frac{K_1(aR)}{a R K_0(aR)}}{m_0 + \frac{m_1 K_1^2(aR)}{K_0^2(aR)}}}, \quad (20)$$

Для вычисления коэффициентов необходимо знать характер распределения перемещений по глубине основания, т. е. функцию $\psi(z)$. Анализ ряда экспериментальных данных [7-10] показывает, что искомая функция может быть хорошо аппроксимирована зависимостью

$$y(z) = e^{-gz}, \quad (21)$$

где γ – коэффициент, зависящий от упругих свойств грунта и изменяющийся в пределах $\gamma = 1,2 \div 1,8 \text{ м}^{-1}$.

Выводы.

Получены выражения для определения частоты свободных колебаний жесткого фундамента на упругом основании под действием импульса нагружения. Эти зависимости, позволяющие решить целый ряд задач по выбору оптимальных режимов работы фундаментов технологических установок в условиях ударно-динамического нагружения.

Список использованных источников:

1. Тараненко М. Е. Электрогидравлическая штамповка, теория, оборудование, техпроцессы / М. Е. Тараненко. – Харьков : Хар. нац. аэро - космич. ун-т Н. Е. Жуковского "ХАИ", 2011. – 274 с.
2. Пневмоударная и статикодинамическая штамповка сложнорельефных деталей упругими срезами : монография / Е. А. Фролов, А. Я. Мовшович, И. В. Манченков [и др.]. – Харьков, 2010. – 286 с.
3. Спеціальні методи обробки тиском / Ю. Є. Шамарін, С. С. Коваленко, Л. Т. Кривда [та ін.]. – Київ : НМК ВО. – 1992. – 208 с.
4. СНиП 2.02.05.87. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. – Дата введ. 01-07-1998. – Л., 1987. – 12 с.
5. Власов В. З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев. – М. : Физматгиз, 1992. – 260 с.
6. Мельников Б. Н. Прибор для измерения послойных деформаций грунта / Б. Н. Мельников, В. Б. Швецов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1968. – № 1. – С. 28-32.
7. Голубков В. Н. Исследования деформации основания фундаментов квадратной и ленточной формы / В. Н. Голубков, Ю. Ф. Тугаенко, И. Л. Сива // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1968. – № 1 – С. 112-118.
8. Абрамов Л. Т. Исследование распределения напряжений в грунтах от статической нагрузки / Л. Т. Абрамов, И. М. Крыжановский, А. Г. Петрова // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1968. – № 6. – С. 64-76.
9. Hosford W. F. Metal Forming: Mechanics and Metallurgy / W. F. Hosford, R. M. Caddell. – 3 edition. – Cambridge : University Press, 2007. – 312 p.
10. Herts P. B. The piercing of sheet metal 1 with rubber / P. B. Herts, S. Garber // Sheet metal industries. – 1964. – No5. – Pp. 761-770.

References

1. Taranenko, ME 2011, *Jelegtrogidravlicheskaja shtampovka, teorija, oborudovanie, tehprocessy*, Harkovskij nacionalnyj ajerokosmicheskij universitet imeni N.E. Zhukovskogo Harkovskij aviacionnyj institut, Harkov.
2. Frolov, EA, Movshovich, AI, Manchenkov, IV & Tarasov, AF 2010, *Pnevmoударная i statikodinamicheskaja shtampovka slozhnorelefnih detalej uprugimi srezami*, Harkov.
3. Shamarin, Yu E, Kovalenko, SS, Krivda, LT et. al. 1992, *Spetsialni metody obrobky tyskom*, NMK VO, Kyiv.
4. Vsesojuznyj nauchno-issledovatel'skij institut stroitel'nogo profilja et. al. 1987, *Stroitelnye Normy i Pravila 2.02.05.87 Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami*, Data vvedenija 01-07-1998, Leningrad.
5. Vlasov, VZ & Leontev, NN 1992, *Balki, plity i obolochki na uprugom osnovanii*, Fizmatgiz, Moskva.
6. Melnikov, BN & Shvecov, VB 1968, 'Pribor dlja izmerenija poslojnyh deformacij grunta', *Osnovanija, fundamenty i mehanika gruntov*, no. 1, pp. 28-32.
7. Golubkov, VN, Tugaenko, YuF & Siva, IL 1968, 'Issledovanija deformacii osnovanija fundamentov kvadratnoj i lentochnoj formy', *Osnovanija, fundamenty i mehanika gruntov*, no. 1, pp. 112-118.
8. Abramov, LT, Kryzhanovskij, IM & Petrova, AG 1968, 'Issledovanie raspredelenija naprjazhenij v gruntah ot staticheskoi nagruзки', *Osnovanija, fundamenty i mehanika gruntov*, no. 6, pp. 64-76.
9. Hosford, WF & Caddell, RM 2007, *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 3rd edn, Cambridge University Press, Cambridge.
10. Herts, PB & Garber S 1964, 'The piercing of sheet metal 1 with rubber', *Sheet metal industries*, no. 5, pp. 761-770.

Стаття надійшла до редакції 19 жовтня 2019 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: PINЦ, 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 12-15 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 загальновизнані 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.slovnyk.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», наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2016 р. № 820 внесено до переліку наукових фахових видань України, в якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

УДК 621 – 622

Машинобудування. Збірник наукових праць. Випуск 24. – Харків, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), 2019. – 136 с.

У збірнику подано результати наукових досліджень в галузі машинобудування. Розглянуто важливі проблеми міцності, стійкості, роботоздатності, динаміки вантажопідйомних, 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 24. – Kharkiv, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy (UEPA), 2019. – 136 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 30.10.2019, Формат 70×100¹/₁₆. Умов. друк. арк. – 8,5.
Гарнітура *Times New Roman*. Друк офсетний. Наклад 50 прим. Ціна договірна.
Свідоцтво серія ДК №6146 від 17.04.2018

ДНЗ «Харківський регіональний центр професійної освіти
поліграфічних медіатехнологій та машинобудування»