

Міністерство освіти і науки України

Державний вищий навчальний заклад
«Приазовський державний технічний університет»
(ДВНЗ «ПДТУ»)

НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО

Міжвузівський тематичний збірник наукових праць

Маріуполь – Краматорськ – Харків – Запоріжжя –
Київ – Дніпро

Випуск 29

Дніпро

2025

Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 29 / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро, ПДТУ, 2025. – 168 с.

Редакційна колегія

Angeliki G. Lekatou: Dr., PhD (Chemical Metallurgy), Professor, Director of the Applied Metallurgy Laboratory, University of Ioannina (UOI), Greece, h-індекс: 20

Hossam Ahmed Mohamed Halfa: Dr., PhD (Metallurgy), Associate professor, Central Metallurgical Research & Development Institute, Cairo, Egypt, h-індекс: 4

Sergey Edward Lyshevski: Dr., PhD (Electrical Engineering), Professor of electrical engineering department of electrical and microelectronic engineering, Rochester Institute of Technology, New York, USA, h-індекс: 18

Белоконь К. В.: кандидат технічних наук (21.06.01 – Екологічна безпека; 183 Технології захисту навколишнього середовища), доцент, доцент кафедри прикладної екології та охорони праці, Запорізька державна інженерна академія, Україна, h-індекс: 3

Білоусов Є. В.: кандидат технічних наук (05.08.05 – Суднові енергетичні установки; 142 Енергетичне машинобудування), доцент, декан факультету суднової енергетики, Херсонська державна морська академія, Україна, h-індекс: 1

Щетиніна В.І.: доктор технічних наук (05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології; 132 Матеріалознавство), професор кафедри зварювання та споріднені технології, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 1

Бялобржеський О. В.: кандидат технічних наук (05.09.01 - Електричні машини й апарати; 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка), В. О. завідуючого кафедрою систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна, h-індекс: 2

Володарець М. В.: кандидат технічних наук (05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів; 273 Залізничний транспорт), старший викладач кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту, Україна, h-індекс: 2

Гришук І. В.: доктор технічних наук (05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту; 271 Річковий та морський транспорт, 272 Авіаційний транспорт, 275 Транспортні технології (за видами), професор, Херсонська державна морська академія, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Україна, h-індекс: 5

Губинський М. В.: доктор технічних наук (05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика; 144 Теплоенергетика), професор, Національна металургійна академія України, професор кафедри промислової теплоенергетики, Україна, h-індекс: 1

Ковалевська О. С.: кандидат технічних наук (05.02.08 - Технологія машинобудування; 131 Прикладна механіка), доцент, доцент кафедри технології машинобудування, Донбаська державна машинобудівна академія, Україна, h-індекс: 1

Грибков Е. П.: доктор технічних наук (05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском; 132 Матеріалознавство), професор, професор кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій, ДДМА, Україна, h-індекс: 7

Лук'яненко А. О.: кандидат технічних наук (05.26.01 – Охорона праці; 263 Цивільна безпека), доцент, завідувач відділу проблем охорони праці і екології в зварювальному виробництві, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, Україна, h-індекс: 1

Мазур В. О.: кандидат технічних наук (05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки; 132 Матеріалознавство), доцент, доцент кафедри нанотехнологій в галузевому машинобудуванні, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 2

Парфененко Ю. В.: кандидат технічних наук (05.13.06 – Інформаційні технології; 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології), доцент, старший викладач кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, Україна, h-індекс: 3

Петренко Т. Г.: кандидат технічних наук (05.13.03 – Системи та процеси керування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології), доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Україна, h-індекс: 2

Плахтій О. А.: кандидат технічних наук (05.09.12 – Напівпровідникові перетворювачі електроенергії; 171 Електроніка), доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Україна, h-індекс: 2

Лаврік В.П.: кандидат технічних наук (05.05.05 – Підйомно-транспортні машини; 133 Галузеве машинобудування), доцент, кафедри підйомно-транспортних машин і деталей машин, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 1

Сасико Ю. Л.: доктор технічних наук (05.09.05 – Теоретична електротехніка; 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка), професор, декан енергетичного факультету, професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 2

Азархов О.Ю.: доктор медичних наук (05.11.17 – Біологічні та медичні прилади і системи; 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка, 163 Біомедична інженерія), професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 3

Ткачов В. В.: доктор технічних наук (05.13.07 – Автоматизація процесів керування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології), професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна, h-індекс: 2

Єфременко В.Г.: доктор технічних наук (05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів; 132 Матеріалознавство, 136 Металургія), професор, завідувач кафедри фізики, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 21

Чабак Ю.Г.: кандидат технічних наук (05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів; 132 Матеріалознавство, 136 Металургія), доцент кафедри фізики, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 15

Ачкасова С. А.: кандидат економічних наук (08.00.08 – Гроші, фінанси і кредит; 051 Економіка, 072 Фінанси, банківська справа та страхування, 073 Менеджмент) доцент, доцент кафедри банківської справи і фінансових послуг, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Україна, h-індекс: 2

Мягких І. М.: доктор економічних наук (08.00.04 – Економіка та управління підприємствами; 051 Економіка, 073 Менеджмент, 075 Маркетинг, 076 Підприємництво, торгівля та біржова діяльність) професор, завідувач кафедри підприємництва та бізнесу, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, h-індекс: 7

Симонов С. І.: кандидат технічних наук (05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди), доцент, завідувача кафедри архітектурного проектування та інженерної графіки, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 1

**Галузь науки,
код (шифр) спеціальності або галузь знань, що відповідає категорії «Б» Переліку
наукових фахових видань України**

Спеціальності:

- 131 - Прикладна механіка (02.07.2020)
- 132 - Матеріалознавство (02.07.2020)
- 133 - Галузеве машинобудування (02.07.2020)
- 136 - Металургія (02.07.2020)
- 271 - Річковий та морський транспорт (02.07.2020)
- 272 - Авіаційний транспорт (02.07.2020)
- 273 - Залізничний транспорт (02.07.2020)
- 274 - Автомобільний транспорт (02.07.2020)
- 275 - Транспортні технології (за видами) (02.07.2020)
- 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (24.09.2020)
- 142 - Енергетичне машинобудування (24.09.2020)
- 144 - Теплоенергетика (24.09.2020)
- 163 - Біомедична інженерія (24.09.2020)
- 171 - Електроніка (24.09.2020)
- 183 - Технології захисту навколишнього середовища (24.09.2020)
- 263 - Цивільна безпека (24.09.2020)

Головний редактор: **Щетинін С. В.** Відповідальний секретар редакції: **Зусін А. М.**
Адреса редакції збірника юридична: 87500, Україна, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, ДВНЗ «ПДТУ». *Фактичне місце розміщення:* Україна, м. Дніпро, вул. Гоголя, 29, ауд. 314. Перереєстрований Державною реєстраційною службою України 26.12.2016. Свідоцтво про державну реєстрацію – серія КВ № 22493-12393ПР. Збірник входить до Переліку наукових фахових видань України та включений до категорії «Б», в якому можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт (Наказ 24.09.2020 № 1188). Друкується згідно рішення Вченої Ради ДВНЗ «ПДТУ» (протокол №11 від 22.05.2025р.). Видається 2 рази на рік.

© Приазовський державний технічний університет (ПДТУ), 2025

ЗМІСТ

Захарова І.В., Куров Є.В.

Структурні перетворення у зоні термічного впливу зварних з'єднань трубної сталі..... 8

Щетиніна В.І., Воленко І.В.

Підвищення корозійної стійкості занурювальних барабанів агрегату цинкування методом наплавлення 13

Щетинін С.В., Десятський С.П.

Керування магнітним полем зварювального струму при зварюванні труб..... 22

Зусін А.М.

Удосконалення технології відновлення коліс мостових кранів з використання наплавного матеріалу з метастабільним аустенітом..... 34

Цокотун П.В., Капустян О.Є.

Розрахунок режимів термовакуумної обробки силових трансформаторів..... 40

Попов С.М., Капустян О.Є.

Алгоритм багатофакторного чисельного методу оптимізації масогабаритних та електричних параметрів зварювальних трансформаторів..... 47

Мітєєв О.А., Петрашов О.С., Капустян О.Є.

Спадкове модифікування вторинних алюмінієвих сплавів..... 54

Сидоренко М.В., Фролов Р.О., Єманов М.В., Капустян О.Є.

Перспективні методи підвищення контактної витривалості сталі EI-347Ш..... 61

Каргін С.Б., Тарасюк Л.І., Бакланський В.М.

Відпрацювання технології розливання трубних марок сталей..... 69

Черевко О.О., Щербаков С.В.

Розробка програмного забезпечення для автоматизованої системи динамічного керування конвертерною плавкою..... 76

Григоренко В.У., Заболотній О.М.

Підвищення жорсткості та міцності і забезпечення зварюваності холодногнутих швелерів..... 83

Щербаков С. В., Черевко О. О.

Комп'ютерні технології в організації дистанційного викладання практичних дисциплін 90

Григоренко В.У., Куцевол С.В.

Визначення параметрів ведучих шестерень з змінним ділільним радіусом для станів холодної прокатки труб..... 95

Григоренко В.У., Іскрижицький Д.В.

Дослідження осередку холодного пільгерного деформування труби при зворотному ході кліті..... 101

Гудзь С.А., Годун Т.М., Дарієнко В.В.

Уточнення геометричних характеристик відкритих тонкостінних поперечних перерізів 107

Нефьодов І.О., Лаврик В.П., Суглобов В.В.

Дослідження умов експлуатації фронтальних навантажувачів..... 116

Суглобов В.В., Кльон А.М.

Аналіз нормативної бази для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач.... 122

Іщенко А.О., Капустін С.В., Вольський Д.І.

Аналіз виходу з ладу вузлів роторних пил..... 129

Лещенко О. І.

Методи підвищення точності позиціонування верстатів з чпк на основі розрахунку системних поправок..... 136

Каращук В.О., Іванченко Д.А., Кіріцева О.В., Джус О.В.

Дослідження аварійності автотранспорту в аспекті соціальної безпеки..... 145

Шумляківський В.П, Чуйко С.П. Прохорчук М.В.

Підвищення безпеки руху на перехрестях з організацією пофазового роз'їзду методом розщепленої фази..... 155

Новини України та світу..... 164

Вимоги до публікацій..... 166

CONTENTS

Zaharova I.V., Kurov E.V. Structural transformations in the heat-affected zone of welded joints in pipe steel.....	8
Shchetynina V.I., Volenko I.V. Increasing the corrosion resistance of the immersion drums of the galvanizing unit by the surfacing method.....	13
Shchetynin S.V., Desiatskyi S.P. Control of the magnetic field of welding current in pipe welding.....	22
Zusin A. M. Improvement of technology for the restoration of bridge crane wheels using filler material with metastable austenite.....	34
Tsokotun P.V., Kapustian O.Ye. Calculation of thermal vacuum treatment modes for power transformers.....	40
Popov S.M., Kapustian O.Ye. Algorithm of multifactor numerical method of optimization of mass, dimensional and electrical parameters of welding transformers.....	47
Mityayev O. A., Petrashev O.S., Kapustian O.Ye. Hereditary modification of secondary aluminum alloys.....	54
Sidorenko M. V., Frolov R. O., Yemanov N. F., Kapustian O.Ye. Advanced methods for improving contact resistance for steel ei-347sh.....	61
Kargin S.B., Tarasiuk LI., Baklansky V.M. Development of the technology of casting pipe steel grades.....	69
Cherevko O., Shcherbakov S. Software development for an automated dynamic control system for converter melting.....	76
Hrygorenko V.U., Zabolotnii O.M. Increasing the rigidity and strength and ensuring the welding of cold-bent channels.....	83
Shcherbakov S., Cherevko O. Computer technologies in the organization of distance teaching of practical disciplines.....	90
Hryhorenko V.U., Kutsevol S.V. Determination of parameters of drive gears with variable pitch radius for cold rolling pipe rolling mitts.....	95
Hrygorenko V.U., Iskrizhytskyi D.V. Research of the cold pipe rolling center during the cage's reverse movement.....	101
Hudz S.A., Godun T.M., Dariienko V.V. Refinement of geometrical properties of open thin-walled cross-sections.....	107
Nefyodov I.O., Lavryk V.P., Suglobov V.V. Research of the operating conditions of front loaders.....	116
Suglobov V.V., Klyon A.M. Analysis of the regulatory basis for force calculation of cylindrical gear transmissions.....	122
Ishchenko A.O., Kapustin S.V., Volsky D.I. Analysis of the outage of rotary saw assembly.....	129
Leshchenko O.I. Methods of increasing the positioning accuracy of cnc machine tools based on the calculation of system parameters.....	136
Karashchuk V. O., Ivanchenko D.A., Kiritseva O.V., Djus O.V. Research on road transport accidents from the aspect of social safety.....	145

Shumlyakivskyi V. P. Chuyko, S.P., Prokhorchuk M

Improvement of traffic safety at intersections with the organization of a split-phase method.... **155**

News of Ukraine and the world **164**

Requirements for publications **166**

СТРУКТУРНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ У ЗОНІ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБНОЇ СТАЛІ

У статті досліджено характер структурних перетворень у зоні термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань трубної сталі 13Г1СУ, що виникають при різних швидкостях охолодження в умовах імітації зварювального термічного циклу. Сталь 13Г1СУ відноситься до низьколегованих конструкційних сталей підвищеної міцності, які широко застосовуються в енергетичній, будівельній і трубопровідній галузях, зокрема у виготовленні магістральних трубопроводів, резервуарів високого тиску та зварних конструкцій, що експлуатуються в умовах низьких температур. Надійність таких зварних з'єднань суттєво залежить від структури та властивостей ЗТВ, яка формується внаслідок нагріву й подальшого охолодження під час зварювання.

Проведено комплекс дилатометричних та мікроструктурних досліджень у діапазоні швидкостей охолодження від 100 до 0,3 °С/с. Встановлено, що в залежності від термодинамічних умов у ЗТВ формується мартенситно-бейнітна, бейнітна, ферито-бейнітна структура або суміші з різним співвідношенням фаз. При високих швидкостях охолодження (100 °С/с) переважає тверда змішана бейнітно-мартенситна структура з високою твердістю (до 358 НV), яка характеризується підвищеною схильністю до холодних тріщин. Із зменшенням швидкості охолодження зменшується вміст мартенситу, зростає частка бейніту та полігонального фериту, що сприяє зниженню твердості й підвищенню пластичності ЗТВ.

На основі отриманих результатів встановлено ділянки температур і відповідні швидкості охолодження, при яких формуються структурні стани з оптимальними механічними характеристиками. Визначено безпечні режими охолодження для зварювання сталі 13Г1СУ, за яких мінімізується ризик утворення твердих та крихких фаз у ЗТВ. Отримані результати є основою для подальшої оптимізації зварювальних технологій та підвищення надійності зварних з'єднань у відповідальних конструкціях.

Ключові слова: *сталь 13Г1СУ, зварювання, зона термічного впливу, мікроструктура, бейніт, мартенсит, ферит, швидкість охолодження, твердість.*

Постановка проблеми. Сталь марки 13Г1СУ — це низьколегована конструкційна сталь, яка використовується при виготовленні труб для магістральних газо- і нафтопроводів, зварних конструкцій у важких умовах експлуатації а також резервуарів і котлів високого тиску. Надалі ці вироби широко застосовується в енергетиці, будівництві, машинобудуванні та трубопроводах, особливо там, де важлива витривалість при низьких температурах, ударна в'язкість та зварюваність.

Одною з основних проблем при зварюванні сталі 13Г1СУ є тенденція до утворення твердих структур (мартенсит, бейніт) у зоні термічного впливу (ЗТВ), особливо при високих швидкостях охолодження, наприклад, при зварюванні в холодному середовищі чи тонких секцій. Це знижує ударну в'язкість і підвищує ризик тріщин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На структурні перетворення у зоні термічного впливу зварних з'єднань впливає як хімічний склад і початковий стан сталі, так і режим нагріву та охолодження під час дугового зварювання, який відрізняється від умов звичайної термічної обробки [1]. ЗТВ має декілька структурних ділянок, які відрізняються за формою і будовою зерен, та характеристики кожної ділянки різняться в залежності від

Машинобудування і зварювальне виробництво

температури [2]. При зварюванні сталей з підвищеним вмістом легуючих елементів в ЗНВ можливе утворення гартівних структур і тріщин [3].

Шляхом побудови термокінетичної діаграми розпаду аустеніту встановлено вплив швидкості охолодження зразків-імітаторів високоміцних броньованих сталей Quardian 500 і Armstal 500 ЗТВ на структуру і тривкість. Встановлено закономірності впливу вуглецю на структуроутворення в металі ЗТВ [4].

В Інституті електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України проводили дослідження, спрямовані на вивчення впливу теплових циклів зварювання на структурні зміни металу в ЗТВ зварних з'єднань високоміцної сталі марки С390 (S355 J2). Встановлено допустимий діапазон швидкостей охолодження металу ЗТВ у температурному інтервалі 600–500 °С та підібрано зварювальні матеріали, які забезпечують властивості зварних з'єднань на рівні вимог до основного металу, а також високу стійкість до утворення холодних тріщин. [5, 6].

Мета дослідження. Метою даної роботи є вивчення структурних перетворень у зоні термічного впливу зварних з'єднань сталі 13Г1СУ при різних швидкостях охолодження та визначення оптимальних умов, які забезпечують мінімізацію дефектності.

Зразки для дилатометричних досліджень вирізали з центральної частини сталевих листів на тій самій висоті, на якій вирізали зразки для механічних випробувань основного металу та зварних з'єднань. На рис. 1 наведено термокінетичну діаграму перетворення аустеніту сталі 13Г1СУ в умовах імітації зварювального термічного циклу, а на рис. 2 — мікроструктуру зразків-імітацій.

У досліджуваному діапазоні швидкостей охолодження (100–0,3 °С/с) перетворення аустеніту під час імітації зварювального термічного циклу відбувається в мартенситній, бейнітній та феритній областях.

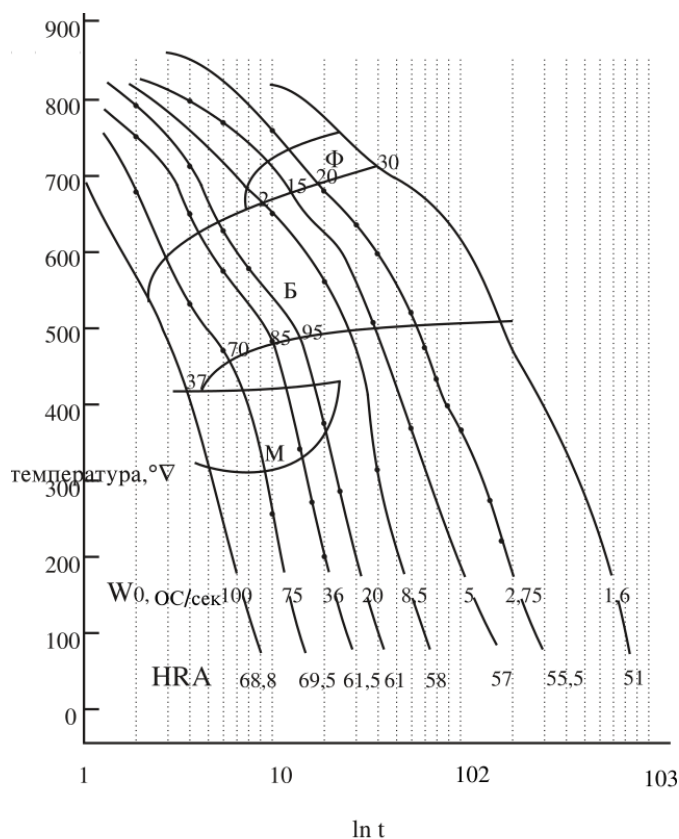


Рисунок 1 – Термокінетична діаграма перетворення аустеніту сталі 13Г1СУ

Машинобудування і зварювальне виробництво

Основний матеріал дослідження. При швидкості охолодження $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ перетворення починається при температурі $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ з утворення бейніту; при $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ воно змінюється на мартенситне. В результаті утворюється змішана бейнітно-мартенситна структура (37% Б і 63% М) з високою твердістю (HV 358). Варто зазначити, що в цій сталі при досліджених швидкостях охолодження чисто мартенситна структура не утворюється. Мартенсит має вигляд світлотравлених ділянок, що складаються з голок різної довжини, розташованих або паралельно, або під кутом 60° . Бейніт має вигляд колоній з тонких паралельних пластин, що ростуть в одному напрямку (рис 2а).

За швидкості охолодження $75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температура початку бейнітного перетворення підвищується до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, вміст бейніту збільшується до 70 %, а мартенситу — зменшується до 30 %, з'являється зона відносної стійкості аустеніту між бейнітною та мартенситною областями. Через зменшення вмісту мартенситу твердість знижується до HV 276. Мартенсит має вигляд світлих ділянок із внутрішньою голчастою будовою (рис. 2b); вони оточені колоніями бейніту з ширшими пластинами та збільшеною відстанню між ними. Через широкий температурний інтервал бейнітного перетворення ширина та відстань між пластинами різна.

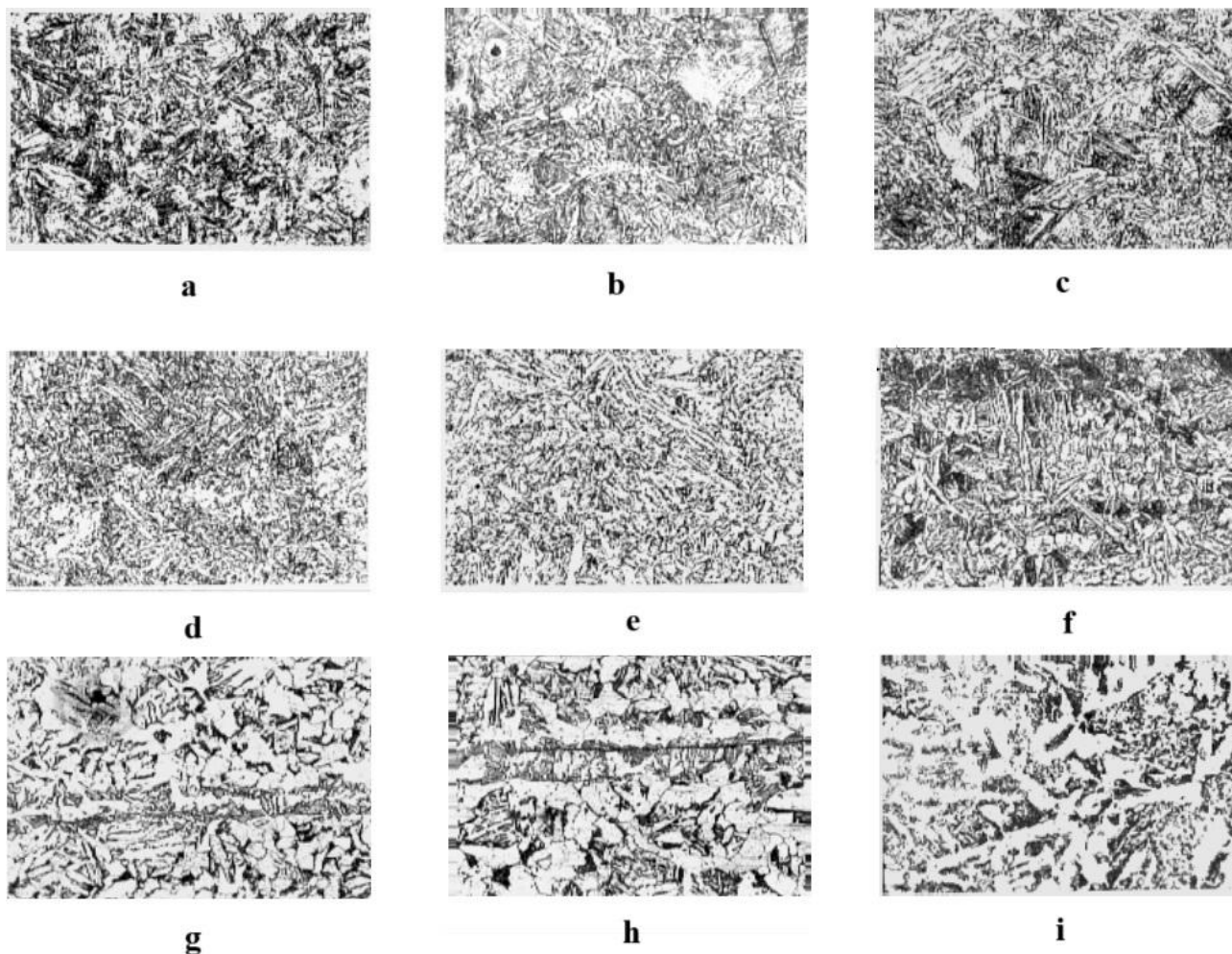


Рисунок 2 – Мікроструктура зразків імітаторів сталі 13Г1СУ, які охолоджувалися зі швидкостями, $^{\circ}\text{C}/\text{с}$: а – 100, б – 75, с – 36, д – 20, е – 8,5, ф – 5, г – 2,7, h – 1,6, і – 0,3

При охолодженні зі швидкістю $36\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ бейнітне перетворення продовжується, температура його початку зростає до $625\text{ }^{\circ}\text{C}$, а вміст бейніту досягає 85 %, мартенситу — 15

Машинобудування і зварювальне виробництво

%. Мікроструктура — суміш бейніту й мартенситу, твердість — 61,7 HRA (238 HV). Бейніт має вигляд колоній з довгими паралельними пластинами (рис. 2с). Порівняно зі швидкістю 75 °C/с при 36 °C/с ширина пластин і відстань між ними більші. Частина пластин подрібнена, вони мають вигляд ланцюжків округлих частинок (глобул), тобто бейніт набуває рис глобулярної структури. Мартенсит оточений бейнітом і має однорідно травлену структуру з голчастою внутрішньою будовою.

За охолодження зі швидкістю 20 °C/с температура початку бейнітного перетворення підвищується до 640 °C, бейніт стає доміантною фазою (95%). У ньому зростає кількість пластин, що розпалися на глобули, тож бейніт стає змішаним: одні ділянки зберігають пластинчасту форму, інші (більшість) — зернисту (рис. 2d). Мартенсит становить 5% і має вигляд світлотравлених острівців, оточених бейнітною матрицею. Твердість зразка — 60,8 HRA (225 HV).

При подальшому зменшенні швидкості охолодження (8,5 °C/с) температура бейнітного перетворення підвищується до 660 °C. Перед утворенням бейніту виділяється незначна кількість (2%) полігонального фериту, який виявляється лише під мікроскопом і має вигляд окремих дрібних зерен (рис. 2е). Структура — бейніт із збереженою голчастою формою, з подальшим потовщенням пластин. Спостерігаються частки темнотравленої бейнітної складової, орієнтовані за напрямом прокату. Мартенсит не утворюється. Твердість — 58,2 HRA (199 HV).

При 5 °C/с зростають процеси утворення полігонального фериту, його частка — до 15 % (решта — бейніт). Температура початку феритного та бейнітного перетворень підвищується, кінець бейнітного — незначно. Структура складається із зерен полігонального фериту, що формують короткі ланцюжки вздовж прокату (рис. 2f). Бейніт має голчасту будову, як при 8,5 °C/с, з підвищеною часткою темнотравленої складової, у вигляді частинок або витягнутих смуг (рис. 2f). Це початкова стадія структурної неоднорідності, властивої прокату металу. Твердість — 56,7 HRA (184 HV).

За швидкості охолодження 2,7 °C/с температура початку перетворень підвищується, частка фериту — 20 %. Феритні ланцюжки стають довшими, місцями розташовуються по межах зерен або витягуються вздовж прокату (рис. 2g). Поряд — зерна бейнітної темнотравленої складової. Ця фаза також рівномірно розподілена в бейнітній матриці, що наближається до глобулярної. Твердість — 55,5 HRA (174 HV).

Подальше уповільнення охолодження (до 1,6 °C/с) підвищує температуру початку перетворень і вміст полігонального фериту до 36 %. Структура подібна до тієї, що при 2,7 °C/с, але з виразнішими рисами. Зростає кількість фериту, який утворює суцільні смуги вздовж меж зерен. Довжина ланцюжків фериту збільшується, вони виглядають як смуги (рис. 2h). Поруч — зерна бейніту, що розпадаються на частинки за типом фази «А». Видно зв'язок структурної неоднорідності з вихідною неоднорідністю прокатки — поблизу витягнутої сульфідної смуги. Твердість — 55,1 HRA (172 HV).

ВИСНОВКИ

При імітації зварювальних термічних циклів у діапазоні швидкостей охолодження 100–1,6 °C/с аустеніт у сталі 13Г1СУ перетворюється в мартенсит, бейніт та ферит. Чисто мартенситне перетворення не спостерігається навіть при 100 °C/с — утворюється 37% бейніту. Високою є температура початку і особливо завершення бейнітного перетворення при цій швидкості (420 і 350 °C). Твердість закономірно зменшується зі зниженням швидкості охолодження, особливо при придушенні мартенситу та розвитку фериту. Структурний аналіз подано в Таблиці 1.

Мінімальні допустимі швидкості охолодження визначаються за діаграмою, використовуючи критерії: твердість HV не більше 350, кількість мартенситу – 50%,

Машинобудування і зварювальне виробництво

температура кінця мартенситного перетворення не нижче 290 °С. З цих критеріїв безпечні швидкості охолодження для сталі 13Г1СУ – включаючи 75 °С/с (30 % М, 276 HV) і нижче.

Таблиця 1 – Структурні перетворення та твердість зразків за різних швидкостей охолодження

Швидкість охолодження, °С/с	Температура початку перетворень, °С	Фази та їхній вміст, %	Структурні особливості	Твердість (HRA / HV)
100	540 (Б), 420 (М)	Б — 37%, М — 63%	Бейніт: колонії тонких пластин; мартенсит: голки під кутом 60° (рис. 2а)	— / 358
75	600	Б — 70%, М — 30%	Бейніт: ширші пластини, збільшена відстань (рис. 2б)	— / 276
36	625	Б — 85%, М — 15%	Бейніт: довгі пластини, частково глобулярний (рис. 2с)	61.7 / 238
20	640	Б — 95%, М — 5%	Бейніт: переважно глобули; мартенсит — острівці (рис. 2д)	60.8 / 225
8,5	660	Б — ~83%, Ф — 2%, М — 0%	Полігональний ферит; бейніт — голчастий, частки темнотравленої фази (рис. 2е)	58.2 / 199
5	>660	Б — ~85%, Ф — 15%, М — 0%	Ферит: ланцюжки вздовж прокату; бейніт: смуги темнотравленої фази (рис. 2ф)	56.7 / 184
2,7	↑	Ф — 20%, решта — Б	Ферит: ланцюжки вздовж прокату; бейніт: глобулярна матриця (рис. 2г)	55.5 / 174
1,6	↑	Ф — 36%, решта — Б	Ферит: смуги вздовж меж зерен; бейніт: фаза «А», структурна неоднорідність (рис. 2г)	55.1 / 172

Список використаних джерел

1. Грабин В.Ф. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей / В.Ф. Грабин, А.В. Денисенко. К.: Наук. думка, 1978. – 272с.
2. Гуменюк І.В. Обладнання та технології зварювальних робіт: навч. посіб. / І.В. Гуменюк. К.: Грамота, 2014. – 120с.
3. Афтандіянц Є.Г. Матеріалознавство: Підручник / Є.Г. Афтандіянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. Херсон: Олді-плюс, Київ: Видавництво Ліра-К, 2013. – 612 с.
4. Костін В.А. Структурні перетворення металу зони термічного впливу зварних з'єднань високоміцних броньових сталей / В.А. Костін, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков, Т.О. Зубер. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2019. Т. 55, № 6. С. 78-83.
5. Позняков В.Д. Технології зварювання для виготовлення і ремонту металевих конструкцій із високоміцних сталей / В.Д. Позняков. Вісник НАН України, 2017, № 1 С.64-70.

Машинобудування і зварювальне виробництво

6. Позняков В.Д. Структура и свойства сварных соединений стали С390 (S355J2) / В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, А.А. Максименко. Автоматическая сварка. 2012. № 8. С. 7—11.

Zaharova I.V., Kurov E.V.

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN THE HEAT-AFFECTED ZONE OF WELDED JOINTS IN PIPE STEEL

The study investigates the nature of structural transformations in the heat-affected zone (HAZ) of welded joints in 13G1SU pipe steel under different cooling rates simulated by welding thermal cycles. 13G1SU steel is a low-alloy high-strength structural steel widely used in the energy, construction, and pipeline industries, particularly in the production of main pipelines, high-pressure vessels, and welded structures operating under low-temperature conditions.

The reliability of such welded joints is significantly influenced by the microstructure and properties of the HAZ, which are formed as a result of heating and subsequent cooling during welding.

A comprehensive dilatometric and microstructural analysis was performed in the cooling rate range of 100 to 0.3 °C/s. It was established that depending on the thermokinetic conditions, the HAZ microstructure may consist of martensitic-bainitic, bainitic, ferritic-bainitic structures, or mixtures with various phase ratios. At high cooling rates (100 °C/s), a hard bainitic-martensitic mixed structure dominates, reaching hardness values up to 358 HV and demonstrating increased susceptibility to cold cracking. As the cooling rate decreases, the martensite content decreases while the proportion of bainite and polygonal ferrite increases, resulting in reduced hardness and enhanced ductility of the HAZ.

Based on the obtained results, temperature ranges and corresponding cooling rates were identified at which structural states with optimal mechanical properties are formed. Safe cooling regimes for welding 13G1SU steel were determined, which minimize the risk of forming hard and brittle phases in the HAZ. The results provide a foundation for further optimization of welding technologies and improvement of welded joint reliability in critical applications.

Keywords: 13G1SU steel, welding, heat-affected zone, microstructure, bainite, martensite, ferrite, cooling rate, hardness.

Стаття надійшла 24.04.2025р.

УДК 621.791.753.042

doi.org/10.31498/2522-9990292025330209

Щетиніна В.І., Воленко І.В.

ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЗАНУРЮВАЛЬНИХ БАРАБАНІВ АГРЕГАТУ ЦИНКУВАННЯ МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕННЯ

Занурювальний барабан, що забезпечує занурення протравленої в сірчаній кислоті полоси в цинк, при безперервному гарячому цинкуванні, з температурою 718 – 728 К в ванні агрегату цинкування, експлуатується під дією високої температури і агресивного середовища, корозії, руху полоси, розплаву, абразивного зносу і конвективних потоків. В результаті зносу під дією високої температури і агресивного середовища занурювальний барабан виходить з строю, що призводить до зупинок агрегату цинкування, електромагнітного викачування рідкого цинку з ванни, збільшення витрати цинку,

Машинобудування і зварювальне виробництво

матеріаломісткості процесу цинкування і собівартості оцинкованого листа, Тому підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості є важливою науково-технічною проблемою. На основі виробничих випробувань шляхом занурення зразків, наплавлених дротами різних хімічних складів, в цинк безпосередньо в ванні агрегату цинкування в процесі гарячого цинкування встановлено, що основним видом зносу занурювальних барабанів агрегату цинкування є корозія. Ефективним способом підвищення корозійної стійкості є наплавлення корозійностійкого металу корозійностійким хромонікелевим дротом Зв08Х21Н10Г6, що забезпечує аустенітну структуру, і подрібнення мікроструктури, значно знижує знос і підвищує відносну зносостійкість філограм поверхні барабана, що побудовані шляхом вимірювання діаметра наплавлених занурювальних барабанів по довжині бочки після експлуатації в ванні агрегату цинкування підтверджено обраний для наплавлення дріт. Встановлено, що на корозійну стійкість, тріщиностійкість та зносостійкість впливає погонна енергія, зі зниженням якої відносна зносостійкість підвищується внаслідок зростання швидкості наплавлення, кристалізації та подрібнення мікроструктури, зменшення тепловкладення, зварювальних напруг та схильності до утворення кристалізаційних і підсолідусиких тріщин. Механізм підвищення корозійної стійкості, тріщиностійкості та зносостійкості при високошвидкісному напавленні на низькій енергії корозійностійким хромонікелевим дротом полягає в забезпеченні структури аустеніту, зростанні швидкості наплавлення, утворенні однорідної мілкодисперсної мікроструктури, зменшенні тепло-вкладень, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій і зварювальних напруг, зростанні швидкості кристалізації, подрібненні мікроструктури, скороченні міжатомної відстані та збільшенні міжатомних зв'язків. Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії занурювальних барабанів агрегату цинкування корозійностійким хромонікелевим дротом Зв08Х21Н10Г6, що забезпечує аустенітну структуру, зменшення тепловкладень, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій і зварювальних напруг, подрібнення мікро-структури, скороченні міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, корозійної стійкості та зносостійкості барабанів більш ніж у 4 рази, зниження витрат цинку, матеріалоємності процесу цинкування і собівартості оцинкованого листа.

Ключові слова: занурювальні барабани агрегату цинкування, високошвидкісне наплавлення на низькій енергії, хромонікелевий легований метал, аустенітна структура, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій, міжатомна відстань, швидкість наплавлення і кристалізації, подрібнення мікроструктури, міжатомні зв'язки, корозійна стійкість, тріщиностійкість.

Постановка проблеми. Занурювальний барабан агрегату цинкування, що виконує функцію натягуючого елемента, експлуатується в умовах абразивного зносу, в результаті тертя о смугу, агресивного середовища, внаслідок травлення поверхні сірчаною кислотою для зачистки від цинку після перевалки та високих температур. Тому, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості занурювальних барабанів агрегату цинкування є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електродугове наплавлення використовувалось для підвищення зносостійкості занурювальних барабанів лінії алюмоцинкування в цеху холодної прокатки Запорізького металургійного комбінату [1]. Однак, вплив хімічного складу дротів, наплавленого металу та погонної енергії на тріщиностійкість, зносостійкість та корозійну стійкість занурювальних барабанів агрегату цинкування досліджено недостатньо [1–9].

Мета досліджень. Встановлення механізму регулювання типу наплавленого металу і розробка процесу високошвидкісного наплавлення на низькій енергії, що забезпечує

Машинобудування і зварювальне виробництво

підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості занурювальних барабанів агрегату цинкування.

Основний матеріал дослідження. Для забезпечення стійкого технологічного процесу нанесення цинкового покриття на холоднокатану смугу, в цехах холодної прокатки застосовується безперервне гаряче цинкування, яке виробляється шляхом пропускання попередньо підготовленої смуги через ванну з розплавленим цинком, при температурі 718 – 728° K.

Занурювальний барабан агрегату цинкування, що виконує функцію натягуючого елемента, експлуатується в умовах абразивного зносу в результаті тертя о полосу, агресивного середовища, внаслідок травлення поверхні сірчаною кислотою для зачистки від цинка після перевалки та високих температур. Крім того, на занурювальний барабан діють конвективні потоки та рух розплаву в ванні, під дією руху смуги.

В результаті зносу, під дією високої температури та агресивного середовища, занурювальний барабан виходить зі строю, що призводить до зупинок агрегату цинкування, зростанню витрат цинку, матеріалоємності процесу цинкування та собівартості оцинкованого листа. Тому, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості є важливою науково-технічною проблемою.

Цинк утворює з залізом хімічні сполуки. Одним із способів запобігання утворенню прошарків інтерметалідів, в результаті їх хімічної взаємодії, є легування цинку елементами, що мають більшу хімічну спорідненість до заліза, ніж цинк. Таким елементом є алюміній, який уведений до складу цинкового розплаву. Цинк утворює з алюмінієм евтектику та широку область твердих розчинів [1]. Так як агрегат цинкування експлуатується в умовах високої температури і корозії, основними видами зношування є термічна втома, корозія та зношування, внаслідок тертя металу по металу. Основним видом зношування є корозія, тому наплавлений занурювальний барабан повинен забезпечувати корозійну стійкість та жаростійкість. Міжкристалічна корозія є наслідком випадання карбідів хрому на межі зерен та утворення мікрогальвано пар, що створює напружений стан і посилює ефективність впливу агресивного середовища.

Для підвищення стійкості занурювальних барабанів агрегату цинкування, доцільно проводити наплавлення корозійностійким хромонікелевим дротом типу 18-8 [1], який забезпечує отримання однорідної структури аустеніту [5–7] і крім хрому та нікелю містить легуючі елементи, що покращують їх експлуатаційні властивості, наприклад, титан, ніобій, кремній, молібден та вольфрам.

Стан поверхні занурювального барабана, який забезпечує занурення холоднокатаної смуги в розплав цинку, значною мірою визначає міцність зчеплення цинку зі смугою, формування та регулювання товщини цинкового покриття і, як результат, якість оцинкованого листа, витрати цинку та матеріаломісткість процесу.

Профіль зносу бочки занурювального барабана впливає на різновисхідність цинкового покриття, його "хвилястість" і "вдавлини", а також інші дефекти. Для міцного зчеплення покриття зі смугою сили адгезії між цинком і смугою повинні бути більше сил когезії розплаву цинку. Барабан, занурюючи смугу в розплав, надає додатковий питомий тиск на цинк, який, підсумовуючись з силами адгезії, забезпечує його зчеплення з поверхнею полоси. Для забезпечення міцності та рівномірності зчеплення, знос барабана має бути більш рівномірним.

Істотним фактором, що впливає на знос барабана, поряд з корозійною стійкістю, є тертя у місці контакту зі смугою. Це призводить до регулярних перевалок занурювальних барабанів, після двотижневої експлуатації в лінії агрегату безперервного гарячого цинкування цеху холодної прокатки. Після вивалки та очищення від цинку, шляхом травлення в розчині сірчаної кислоти, занурювальний барабан проточується на токарному станку до відновлення необхідного профілю бочки і усунення слідів корозійного руйнування поверхні. Це

Машинобудування і зварювальне виробництво

призводить до зменшення діаметра бочки барабана і після трьох-чотирьох перевалок до повного виходу з строю.

Проблема наплавлення занурювальних барабанів визначається умовами експлуатації при високій температурі, з взаємодією агресивного середовища

Для визначення типу наплавленого металу, що забезпечує високу зносостійкість і корозійну стійкість в умовах агресивного середовища та високої температури, проведені дослідження впливу хімічного складу зварювальних дротів на властивості наплавленого металу. Наплавлення проводилось на пластини зі сталі 08КП зварювальними дротами типу 08Х21Н10Г6, Х9Г2МФС, 08Х19Н9Ф2С2, 12Х20Н16Г7Т, 12Х12Г12СФ, вибір яких обґрунтований необхідністю забезпечення корозійної та абразивної стійкості. Дослідження проводились в виробничих умовах. Наплавленні зразки занурювали в розплавлений цинк агрегату цинкування. В процесі виробничих випробувань, на зразки впливали конвективні потоки рідкого цинка. Абразивний знос, внаслідок тертя металу по металу був виключений, так як зразки занурювались у ванну агрегату цинкування без контакту з половою. Після випробувань проводились заміри зразків, на підставі яких вибрано дріт для наплавлення занурювальних барабанів.

Проведені дослідження дозволили встановити, що найбільш високу зносостійкість і корозійну стійкість в умовах високих температур забезпечує дріт Зв08Х21Н10Г6, при напавленні яким активного шару занурювального барабана забезпечується отримання хромонікелевої аустенітної сталі, легованої хромом, нікелем і марганцем в кількостях, що забезпечують отримання стійкого аустеніту.

Введення до складу зварювального дроту до 7 – 8 % марганцю дозволяє замінити частину нікелю та забезпечити отримання чистої аустенітної структури. Заміна нікелю марганцем, крім аустенітної структури, підвищує твердість та зносостійкість наплавленого металу.

Перед напавленням, занурювальні барабани піддаються механічній обробці або шліфуванню, до повного видалення поверхневих дефектів типу тріщин, раковин, вм'ятин, фарбувань, сітки корозійних тріщин, нерівномірного зносу. Товщина шару, що знімається, повинна бути не менше 0,005 м, для запобігання попаданню цинку з поверхні бочки в напавлений метал і появи дефектів типу пор, раковин і свищів.

Однією з основних труднощів зварювання та напавлення сталей аустенітного класу [6,9] є запобігання появи кристалізаційних та підсолідусних тріщин, що забезпечується за допомогою введення другої фази безпосередньо в процесі кристалізації, додаткового легування елементами, подрібнення первинної структури, шляхом легування елементами-модифікаторами, підвищення чистоти металу, що сприяє утворенню легкоплавких фаз, та технологічних заходів.

Для підвищення корозійної стійкості, тріщиностійкості та зносостійкості занурювальних барабанів агрегату цинкування, збільшення продуктивності процесу, зниження енергоємності, рекомендується напавлення на низькій погонній енергії, зі швидкістю 75 м/год. При цьому, продуктивність процесу становить 15,2 кг/год.

Напавлення на низькій погонній енергії забезпечує зменшення тепловкладення в напавлений метал занурювального барабану, зниження мікроспотворень кристалічної решітки, щільності дислокацій та подрібнення структури, зменшення частки участі основного металу і зменшення зони відпуску. В результаті знижуються зварювальні напруги [8,9] і підвищується корозійна стійкість, тріщиностійкість наплавленого занурювального барабана агрегату цинкування, що сприяє забезпеченню підвищення зносостійкості і зниження витратного коефіцієнта металу на 1 тону прокату. Корозійна стійкість і тріщиностійкість визначає зносостійкість і довговічність занурювальних барабанів агрегату цинкування, матеріаломісткість процесу і собівартість прокату.

Ефективним способом підвищення тріщиностійкості є високошвидкісне електродугове напавлення на низькій погонній енергії занурювального барабана агрегату цинкування, при

Машинобудування і зварювальне виробництво

якому змінюються умови існування дуги, зменшується тепловкладення, збільшується швидкість нагріву і охолодження рідкого металу навколошовної зони. Це призводить до зміни умов кристалізації ванни, деформації, зварювальних напруг, подрібненню мікроструктури і якості наплавленого металу.

Подрібнення мікроструктури найбільш ефективно при високошвидкісному наплавленні на низькій погонній енергії, внаслідок підвищення швидкості нагріву та охолодження, кількості центрів кристалізації, які, розташовуючись попереду фронту зростаючих кристалів, пригнічують їх подальший зріст.

На підставі проведених досліджень, встановлено механізм підвищення тріщиностійкості при високошвидкісному електродуговому наплавленні на низькій погонній енергії занурювальних барабанів агрегату цинкування, за рахунок зменшення деформації, зварювальних напруг, зони відпуску і подрібнення мікроструктури. Для підвищення зносостійкості занурювального барабана агрегату цинкування, рекомендується розробити енергозберігаючий спосіб високошвидкісного електродугового наплавлення на низькій погонній енергії.

Перед наплавленням, занурювальні барабани піддаються механічній обробці або шліфуванню, до повного видалення поверхневих дефектів типу тріщин, раковин, вм'ятин, фарбувань, сітки корозійних тріщин, нерівномірного зносу. Товщина шару, що знімається, повинна бути не менше 0,005 м, для запобігання попаданню цинку з поверхні бочки в наплавлений метал і появи дефектів типу пор, раковин і свищів.

Занурювальний барабан агрегату цинкування ЦХП виготовлений з низьковуглецевої киячкої сталі 08КП, яка не схильна до утворення тріщин, добре зварювальна сталь, тому електродугове наплавлення проводиться без підігріву.

Наплавлення занурювальних барабанів проводилось на постійному струмі оберненої полярності. В якості джерела живлення використовували ВДУ-1204. При зміцнюванні занурювальних барабанів, спочатку проводиться наплавлення буферновідновлюючого шару дротом Зв08Г2С, діаметром 0,004 м під флюсом АН-60, на режимі: струм $I=750-800$ А, напруга на дузі $U=30-32$ В, швидкість наплавлення $V=0,021$ м/с. Потім проводиться наплавлення корозійностійкого шару дротом Зв08Х21Н10Г6 діаметром 0,004 м під флюсом АН-26П, на режимі: $I=700-750$ А, $U=30-32$ В, $V=0,021$ м/с, погонна енергія $q_i/V=1,1$ МДж/м.

Для підвищення тріщиностійкості, розроблено процес наплавлення в аргоні. При зміцненні занурювальних барабанів, спочатку проводиться наплавлення буферновідновлюючого шару дротом Зв08А, Зв08ГА діаметром 0,0024 м в аргоні, на режимі: струм $I=620$ А, напруга на дузі $U=23$ В, швидкість наплавлення $V=0,021$ м/с. Потім проводиться наплавлення корозійностійкого шару дротом Зв08Х21Н10Г6 діаметром 0,0024 м в аргоні, на режимі: $I=620$ А, $U=23$ В, $V=0,021$ м/с, погонна енергія $E_p=q_i/V=0,69$ МДж/м.

Наплавлення занурювальних барабанів проводилося за схемою "спірального намотування або слаломного" зміщення головки наплавлення після кожного обороту, по всій довжині бочки. Наплавлення проводилося з кроком $(8-10) \cdot 10^{-3}$ м, що забезпечувало отримання рівної наплавленої поверхні. Число проходів визначалося, виходячи з початкового діаметру бочки барабана. Кількість проходів забезпечувало отримання корозійностійкого шару товщиною не менше 0,008 м на бік. При цьому, участь основного металу в наплавленому зведено до нуля, що забезпечило заданий хімічний склад, високу зносостійкість і корозійну стійкість.

Після наплавлення вироблялася механічна обробка і занурювальний барабан встановлювали в агрегат цинкування. Після експлуатації наплавлених занурювальних барабанів (рис. 1 а) в агрегаті цинкування, вимірювався діаметр по довжині бочки, і будувалася філограма поверхні барабана (рис.1б). Порівняння зносостійкості наплавлених і стандартних занурювальних барабанів проводилося за даними відносного зносу бочки на 10^3 кг прокату та

Машинобудування і зварювальне виробництво

коефіцієнта зносу на 10^3 кг прокату в одиницю часу (рис.1 в).

Для забезпечення безперебійної роботи агрегату цинкування, робоча поверхня занурювального барабана агрегату цинкування повинна зберігати велику твердість при впливі високих температур, мати достатню корозійну стійкість, абразивну стійкість і тріщиностійкість.

За результатами експлуатаційних даних встановлено, що наплавлення корозійностійкого шару значно знижує знос і підвищує відносну зносостійкість занурювальних барабанів. Основним видом зношування є корозія, тріщиностійкість та зносостійкість визначається корозійною стійкістю.

На зносостійкість впливає погонна енергія, із зменшенням якої відносна зносостійкість підвищується. Це є наслідком збільшення швидкості кристалізації та подрібнення мікроструктури, що призводить до підвищення корозійної стійкості та зносостійкості наплавленого металу. Одночасно з подрібненням структури, при високошвидкісному наплавленні на низькій енергії, зменшується тепловкладення, знижуються зварювальні напруги і схильність до утворення кристалізаційних та підсолідусних тріщин.

При підвищенні швидкості наплавлення посилюється охолодження, зменшуються розміри активних плям, погонна енергія і тепловкладення в основний метал. Це призводить до зниження мікроспотворень кристалічних решітки, мікронапруг, щільності дислокацій і зварювальних напруг, що підвищує зносостійкість наплавленого металу.

З встановленої закономірності впливу погонної енергії на знос випливає, що з підвищенням швидкості наплавлення посилюються конвективні потоки рідкого металу у ванні, що забезпечує утворення однорідної дрібнодисперсної мікроструктури та підвищення корозійної стійкості. Крім того, при підвищенні швидкості наплавлення та зниження погонної енергії, зменшується глибина проплавлення та частка участі основного металу в наплавленому, що підвищує корозійну стійкість, тріщиностійкість та зносостійкість занурювальних барабанів.

На підставі встановленої закономірності впливу погонної енергії на зносостійкість наплавленого металу, розроблено процес наплавлення занурювальних барабанів дротом Зв08Х21Н10Г6, що забезпечує аустенітну структуру, корозійну стійкість, тріщиностійкість і зносостійкість занурювальних барабанів агрегату цинкування.

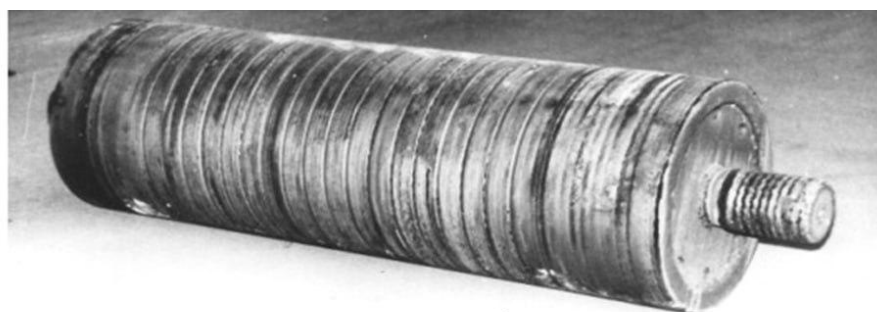
Механізм підвищення корозійної стійкості, тріщиностійкості та зносостійкості при високошвидкісному наплавленні на низькій енергії, полягає у збільшенні швидкості наплавлення, утворенні однорідної дрібнодисперсної мікроструктури, зменшенні тепловкладень, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруги та щільності дислокацій, зварювальних напруг, скорочення міжатомної відстані та зростання міжатомних зв'язків.

Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії занурювальних барабанів агрегату цинкування корозійностійким хромонікелевим дротом Зв08Х21Н10Г6, що забезпечує аустенітну структуру, підвищення корозійної стійкості та зносостійкості барабанів, зниження витрат цинку та собівартості оцинкованого листа.

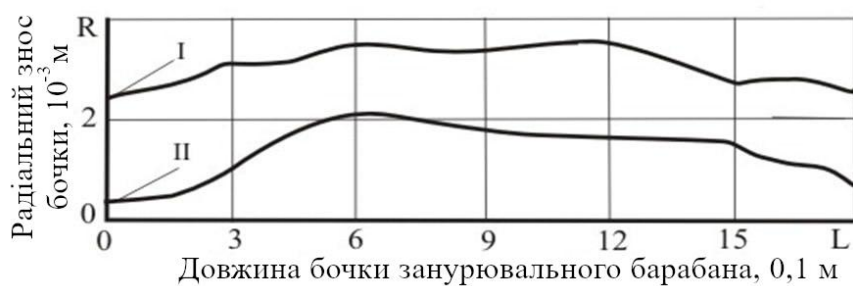
Розроблений процес застосовується для наплавлення занурювальних барабанів та зварювання ванни агрегату цинкування, що значно скорочує час ремонту, зупинки, особливо з урахуванням відкачування цинку з ванни електромагнітним способом та собівартості оцинковки.

Високошвидкісне наплавлення на низькій енергії корозійного шару дозволило підвищити корозійну стійкість, тріщиностійкість, зносостійкість і довговічність занурювальних барабанів агрегату цинкування цеху холодного прокату більш ніж у 4 рази.

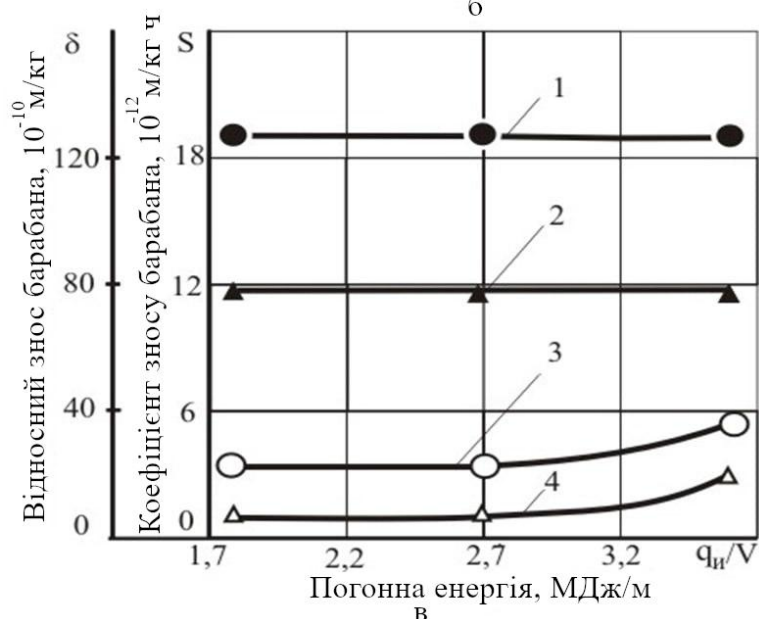
Збільшення зносостійкості наплавлених занурювальних барабанів підвищило якість і випуск оцинкованого листа, за рахунок скорочення часу на перевалки і зупинки стану. Наплавлення занурювальних барабанів впроваджено на ПАТ "Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча".



а



б



в

Рисунок 1 – Погружной барабан агрегата цинкування після експлуатації(а), профілограма зносу після прокатки(б): I – барабан зі сталі 08КП прокатав 3899000кг металу; II – наплавлений барабан, який прокатав 10621000 кг металу. Залежність відносного зносу(1,3) та коефіцієнту зносу(2,4) від погонної енергії(в): зі сталі 08КП(1,2); наплавлений барабан(3,4)

Високошвидкісне наплавлення корозійностійким хромонікелевим дротом Зв08Х21Н10Г6 та Зв0619Н9Т є ефективним способом підвищення корозійної стійкості, тріщиностійкості та зносостійкості деталей металургійного обладнання.

Встановленні закономірності і розроблений спосіб наплавлення на низькій енергії, за рахунок корозійностійкого хромонікелевого дроту, можуть бути використані при високошвидкісному наплавленні.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси наплавлення на низькій енергії елементів конструкції прокатних станів, які забезпечують підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості.

ВИСНОВКИ

Занурювальний барабан, що забезпечує занурення протравленої в сірчаній кислоті смуги в цинк, при безперервному гарячому цинкуванні з температурою 718 – 7280 К, в ванні агрегату цинкування, експлуатується під дією високої температури і агресивного середовища, корозії, руху смуги, розплаву, абразивного зносу і конвективних потоків. В результаті зносу, під дією високої температури і агресивного середовища, занурювальний барабан виходить зі строю, що призводить до зупинок агрегату цинкування, електромагнітного викачування рідкого цинку з ванни, збільшенню витрати цинку, матеріаломісткості процесу цинкування і собівартості оцинкованого листа. Тому, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості є важливою науково-технічною проблемою.

На основі виробничих випробувань, шляхом занурення зразків, наплавлених дротами різних хімічних складів, в цинк безпосередньо в ванні агрегату цинкування, в процесі гарячого цинкування встановлено, що основним видом зносу занурювальних барабанів агрегату цинкування є корозія. Ефективним способом підвищення корозійної стійкості є наплавлення корозійностійкого металу корозійностійким хромонікелевим дротом Зв08Х21Н10Г6, що забезпечує аустенітну структуру, і подрібнення мікроструктури, значно знижує знос і підвищує відносну зносостійкість.

Виходячи з аналізу філограм поверхні барабана, що побудовані шляхом вимірювання діаметра наплавлених занурювальних барабанів по довжині бочки після експлуатації в ванні агрегату цинкування, підтверджено обраний для наплавлення дрот. Встановлено, що на корозійну стійкість, тріщиностійкість та зносостійкість впливає погонна енергія, зі зниженням якої відносна зносостійкість підвищується, внаслідок зростання швидкості наплавлення, кристалізації та подрібнення мікроструктури, зменшення тепловкладення, зварювальних напруг та схильності до утворення кристалізаційних і підсолідусиих тріщин.

Механізм підвищення корозійної стійкості, тріщиностійкості та зносостійкості, при наплавленні на низькій енергії корозійностійким хромонікелевим дротом, полягає в забезпеченні структури аустеніту, зростанні швидкості наплавлення, утворенні однорідної мілкодисперсної мікроструктури, зменшенні тепловкладень, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій і зварювальних напруг, зростанні швидкості кристалізації, подрібненні мікроструктури, скороченні міжатомної відстані та збільшенні міжатомних зв'язків.

Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії занурювальних барабанів агрегату цинкування корозійностійким хромонікелевим дротом Зв08Х21Н10Г6, що забезпечує аустенітну структуру, зменшення тепловкладень, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій і зварювальних напруг, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, корозійної стійкості та зносостійкості барабанів більш ніж у 4 рази, зниження витрат цинку, матеріалоемності процесу цинкування і собівартості оцинкованого листа.

Список використаних джерел

1. Каленський В.К. Відновлення наплавленням деталей агрегату для алюмоцинкування рулонної сталі /В.К. Каленський, А.В. Семеніхін, Д.П. Новікова // Автоматичне зварювання. - 1998. - №2. - С.38 – 44.

Машинобудування і зварювальне виробництво

2. Технологія, матеріали, обладнання / І.А. Рябцев, І.А. Кондратьєв, Є.Ф. Переплетчиков, Ю.М. Кусков. – Київ, ІЕЗ ім. О.О. Патона НАНУ, 2015. – 402 с.
3. Рябцев І.А. Наплавлення деталей машин та механізмів. – Київ: Екотехнологія, 2004. – 160 с.
4. Вплив погонної енергії на утворення відколів при наплавленні високовуглецевої сталі аустенітними дротами / В.К. Каленський, Я.П. Черняк, В.Г. Васильєв, Т.Г. Соломійчук // Автоматичне зварювання. - 2001. - №11. – С. 11–14.
5. Хакімов О.М. Методика визначення допустимих термічних циклів зварювання на основі результатів дослідження кінетики фазових перетворень аустеніту/ О.М. Хакімов / Зварювальне виробництво. - 1983. - №5. – С.1 – 3.
6. Волобуєв Ю.В. Оцінка впливу параметрів термічного циклу зварювання на розмір аустенітного зерна у зоні термічного впливу сталей типу 12ХН4МА / Ю.В. Волобуєв, В.Г. Федоров, Г.Б. Кулігін // Зварювальне виробництво. - 1983. - №12. – С.6 – 8.
7. Стеклов О.І. Використання плазмового способу наплавлення для нанесення корозійностійкого шару газонафтохімічної апаратури, що працює у водневих середовищах/ О.І. Стеклов, А.В. Алексєєв, О.А. Александров // Зварювальне виробництво. - 1989. - №5. – С.1 – 3.
8. Фролов В.В. Теоретичні основи зварювання/ В.В. Фролов, В.А. Вінокуров. - К.: Вища школа, 2002. - 591 с.
9. Вплив погонної енергії на утворення відколів при наплавленні високовуглецевої сталі аустенітними дротиками / В.К. Каленський, Я.П. Черняк, В.Г. Васильєв, Т.Г. Соломійчук // Автоматичне зварювання. - 2001. - №11. – С. 11–14.

Shchetynina V.I., Volenko I.V.

INCREASING THE CORROSION RESISTANCE OF THE IMMERSION DRUMS OF THE GALVANIZING UNIT BY THE SURFACING METHOD

The galvanizing unit immersion drum, which ensures the immersion of the strip etched in sulfuric acid into zinc during continuous hot galvanizing with a temperature of 718 - 728 K in the galvanizing bath, is operated under the high temperature and aggressive environment, corrosion, the strip movement, melt, abrasive wear and convective flows action. As a result of wear, under the high temperature and aggressive environment action, the immersion drum is out of order, which leads to the galvanizing unit stopping, electromagnetic pumping of liquid zinc from the bath, zinc consumption an increase, the galvanizing process material intensity and the galvanized sheet cost price an increase. Therefore, increasing crack resistance, wear resistance and corrosion resistance is an important scientific and technical problem.

Based on production tests by immersing samples deposited with various chemical compositions welding wires into zinc directly in the galvanizing unit bath during the hot-dip galvanizing process, it was established that the galvanizing unit immersion drums the main wear type is corrosion. An effective way to increase corrosion resistance is to weld corrosion-resistant metal with corrosion-resistant chromium-nickel wire Sv08Kh21N10G6, which provides an austenitic structure and microstructure refinement, significantly reduces wear and relative wear resistance increases.

The wire selected for surfacing was confirmed from the drum surface profilograms constructed the deposited immersion drums by measuring the diameter along the barrel length after operation in the galvanizing unit bath. It was established that corrosion resistance, crack resistance and wear resistance are affected by the linear energy, with a decrease which the relative wear resistance increases, due to the surfacing speed, crystallization an increase and microstructure refinement, the heat input, welding stresses and the tendency to form crystallization and subsolid us cracks a reduction.

Машинобудування і зварювальне виробництво

The mechanism for increasing corrosion resistance, crack resistance and wear resistance during high-speed low-energy surfacing with corrosion-resistant wire consists of ensuring the austenite structure, increasing the surfacing speed, forming a homogeneous fine-dispersed microstructure, and reducing heat input, the crystal lattice micro distortions, microstresses and dislocation density, welding stresses, increased crystallization rate, the microstructure refinement, interatomic distances reduction and interatomic bonds growth.

A high-speed low-energy of galvanizing unit immersion drums with corrosion-resistant chromium-nickel wire Sv08Kh21N10G6 surfacing process has been developed, which provides an austenitic structure, a homogeneous fine-grained microstructure, heat input, the crystal lattice micro distortions, microstresses and dislocation density, welding stresses, interatomic distances reduction, interatomic bonds, corrosion resistance and wear resistance drums more than 4 times increase, zinc consumption, the galvanizing process material intensity and galvanized sheet cost price reduction.

Keywords: *The galvanizing unit immersion drum, high-speed low-energy corrosion-resistant chromium-nickel metal, an austenitic structure, homogeneous fine-grained microstructure, the crystal lattice micro distortions, microstresses and dislocation density, welding stresses, interatomic distances, interatomic bonds, corrosion resistance and wear resistance.*

Стаття надійшла 12.05.2025 р.

УДК 004.056.53:519.17

doi.org/10.31498/2522-9990292025330211

Щетинін С.В., Десятський С.П.

КЕРУВАННЯ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ

Збільшення виробництва труб зумовлено швидким розвитком трубопровідного транспортування газоподібних, рідких та сипких середовищ, подальшим розвитком містобудування та різних галузей машинобудування.

Широке використання труб обумовлено можливістю транспортування по них різних продуктів і високими механічними властивостями труб, які при порівняно невеликій масі мають значний запас міцності і великий опір вигину і скручування.

Найбільший попит на світовому ринку мають труби для магістральних газо- і нафтопроводів, які експлуатуються при коливаннях температури (від -40 до +50°C) і виготовляються з вуглецевих і низьколегованих сталей.

Україна економічно зацікавлена у транспортуванні газу та нафти через свою територію та будівництво трубопроводів. Тому доцільно розробляти нові способи зварювання труб, що забезпечують підвищення продуктивності, якості та ударної в'язкості зварних з'єднань, зниження енергоємності, матеріаломісткості та собівартості труб.

В даний час якісне формування зварних швів при односторонньому зварюванні забезпечується за рахунок утримання рідкого металу зварювальної ванни спеціальними підкладками, флюсами, мідними та мідно-флюсовими подушками, поперечним магнітним полем.

При зварюванні труб, за розробленим способом, збільшується площа, якою обертається активна пляма, зменшується в 4 рази тиск дуги, що забезпечує при односторонньому високошвидкісному зварюванні якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці незалежно від зазору в стику.

Встановлено закономірність розподілу магнітного поля зварювального струму у зварювальній ванні, пластинах та трубах. При протіканні струму пластинами індукція на середині товщини металу дорівнює нулю і зростає при наближенні до поверхні. Максимальне

Машинобудування і зварювальне виробництво

значення індукції розміщується на поверхні. При переході від верхньої до нижньої поверхні індукція змінює напрямок протилежне.

Ключові слова: магнітне дуття, індукція магнітного поля, відносна магнітна проникність феромагнетика, феромагнітна труба.

Постановка проблеми. При односторонньому високошвидкісному зварюванні якість формування швів визначається стабільністю процесу, що знижується при магнітному дутті. Замкнений контур труб посилює магнітне дуття, внаслідок чого порушується стабільність процесу формування швів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Магнітне поле, при протіканні струму провідником, досліджено на високому науковому рівні Р.М. Уайтом, Г.П. Абрамовичем, Г.Є. Зільберманом [1-3]. Високошвидкісне зварювання забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань. Однак, підвищення швидкості зварювання обмежено порушенням формування швів в результаті утворення підрізів та магнітним дуттям.

Підрізи обмежують підвищення швидкості зварювання і досліджені в достатній мірі. Природа утворення підрізів фундаментально вивчена Б.Є. Патоном, В.К. Лебедевим, І.В. Пентеговим, С.Л. Мандельбергом. Одні вважають, що підрізи утворюються внаслідок збільшення поверхневого натягу, інші внаслідок відхилення дуги назад, треті, в результаті підвищення тиску дуги. Однак, природа утворення підрізів та вплив магнітного поля зварювального струму на магнітне дуття, при високошвидкісному зварюванні, повністю не встановлені.

Мета дослідження. Розробка процесу одностороннього високошвидкісного зварювання, що забезпечує запобігання магнітному дуттю та підвищення стабільності процесу якості зварних з'єднань, за рахунок керування магнітним полем зварювального струму.

Основний матеріал дослідження. Однією з гострих проблем при зварюванні є магнітне дуття. Особливо посилюється магнітне дуття при зварюванні труб [4–8], внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля у феромагнітній трубі.

Під дією електромагнітної сили, дуга відхиляється у бік поля меншої напруженості, до природного розриву(рис.1), отже дугу неможливо закрити флюсом. При цьому, напруга зростає, струм падає. Електрод подається, закорочує на виріб, і знову збуджується дуга. При закорочуванні на виріб струм зростає, знижується напруга.

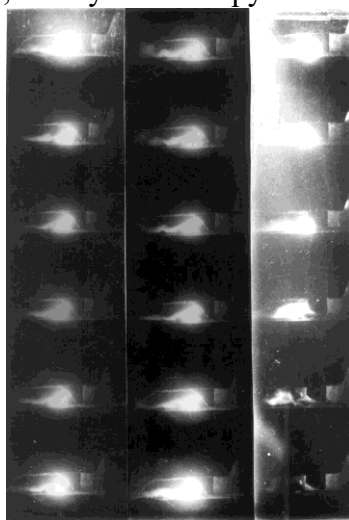


Рисунок 1 – Кінограма нахилу дуги назад, аж до розриву, під дією електромагнітної сили при високошвидкісному зварюванні складовим електродом

в аргоні: $I = 2300 - 2400$ А; $U = 23 - 24$ В

Інтервал між кадрами $6 \cdot 10^{-4}$ с; напрямок зварювання – зліва направо

Машинобудування і зварювальне виробництво

Процес періодично повторюється, формування швів порушується. Посилення магнітного дуття при зварюванні труб загально відоме, проте магнітне поле при зварюванні труб досліджено недостатньо.

Вимірювання магнітного поля зварювального струму в навколодуговому просторі утруднено високою температурою, тому, при наближенні до дуги та зварювальної ванни, на відстань менше 0,016 м, ізолюваний кварцом зонд вимірювача магнітної індукції згоряє. У зв'язку з цим, доцільно дослідити розподіл магнітного поля зварювального струму в навколодуговому просторі розрахунковим шляхом. При розрахунку індукції магнітного поля для прямолінійного провідника, зі струмом малого перерізу нескінченної довжини

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

[3] вплив форми провідника на поле не враховується. При зварюванні, струм протікає по провідникам великих перерізів, форма яких впливає на індукцію магнітного поля, тому розроблені математичні моделі магнітного поля струму в пластинах і трубах.

Розрахунок магнітного поля струму, що протікає по виробу, виконується на основі закону Біо-Савара-Лапласа і принципу суперпозиції магнітних полів [3]. Для визначення магнітного поля в зазорі пластин (без урахування крайових ефектів), розіб'ємо їх на нескінченно довгі тонкі провідники перетином $dx dy$.

Індукція магнітного поля, що створений елементом нескінченно довгого провідника струму, що протікає через майданчик, з координатами x, y перетином $dx dy$, у точці (x_0, y_0) (рис.2а):

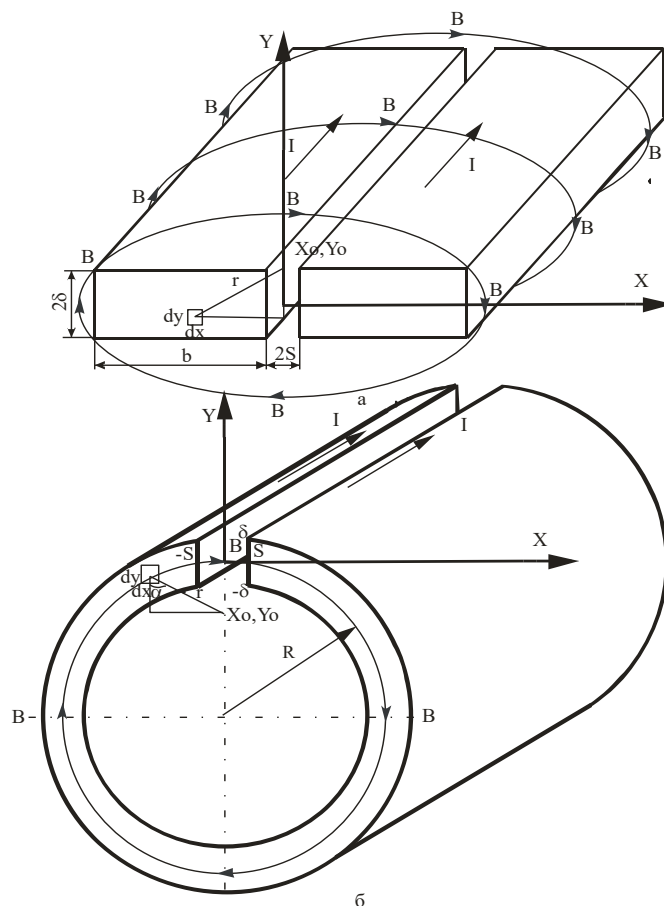


Рисунок 2 – Розрахункова схема магнітного поля зварювального струму, що протікає по пластинах (а) та трубі (б)

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$dB = \mu\mu_0 \frac{Idxdy}{2\pi\sqrt{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]}4\delta b}, T, \quad (1)$$

де, μ – відносна магнітна проникність феромагнетика; μ_0 – магнітна постійна, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; I – струм, що протікає по двох пластинах, А; δ – половина товщини пластин, м; b – ширина пластини, м.

Індукція магнітного поля

$$dB = \sqrt{dB_x^2 + dB_y^2}, T, \quad (2)$$

де, dB_x – поперечна складова, $dB_x = dB \frac{y-y_0}{r}$, T; dB_y – поздовжня складова,

$dB_y = dB \frac{x-x_0}{r}$, T; r – відстань від елемента струму, м.

Індукція поперечного магнітного поля

$$dB_x = \mu\mu_0 \frac{I(y-y_0)dxdy}{8\pi\delta b[(\delta-\delta_0)^2 + (y_0-y)^2]}, T. \quad (3)$$

Індукція поздовжнього магнітного поля

$$dB_y = \mu\mu_0 \frac{I(x-x_0)dxdy}{8\pi\delta b[(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2]}, T. \quad (4)$$

Індукція поперечного та поздовжнього магнітних полів у точці x_0, y_0 , відповідно, визначається інтегруванням виразів (3) та (4):

$$B_x = \mu\mu_0 \frac{I}{8\pi\delta b} \int_{-\delta}^{\delta} \left(\int_{-b-s}^{-s} \frac{(y-y_0)dy}{(y_0-y)^2 + (x-x_0)^2} + \int_s^{s+b} \frac{(y-y_0)dy}{(y_0-y)^2 + (x-x_0)^2} \right) dx, T; \quad (5)$$

$$B_y = \mu\mu_0 \frac{I}{8\pi\delta b} \int_{-\delta}^{\delta} \left(\int_{-b-s}^{-s} \frac{(x-x_0)dx}{(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2} + \int_s^{s+b} \frac{(x-x_0)dx}{(x-x_0)^2 + (y_0-y)^2} \right) dy, T. \quad (6)$$

Індукцію розраховували на персональному комп'ютері. Розрахункові значення добре узгоджуються з експериментальними даними, отриманими при моделюванні процесу (рис.3) і вимірюванні магнітної індукції в зазорі стику, по всій товщині і на відстані від виробу, тесламетром ЕМ4305. Для адекватності моделі реальним умовам, вимірювання індукції виконували, при пропусканні по виробу струму 2100 А, характерного для зварювання складовим електродом. Як джерело живлення використовували зварювальний випрямляч ВМГ-5000.

В результаті розрахунку залежності $B_x(y)$ при $x=0$ і проведених досліджень, встановлено, що при протіканні струму пластинами індукція в середині товщини пластини дорівнює нулю, внаслідок взаємного знищення полів рівної величини протилежних напрямків, згідно з принципом суперпозиції.

При наближенні до поверхні пластини, відстань від її іншої поверхні збільшується, компенсуюча дія полів зменшується і величина індукції магнітного поля зростає, Максимальне значення індукції досягається на поверхні (рис.3). Це свідчить про те, що

Машинобудування і зварювальне виробництво

максимальні електромагнітні сили міжatomної взаємодії визначають міцність зварного з'єднання.

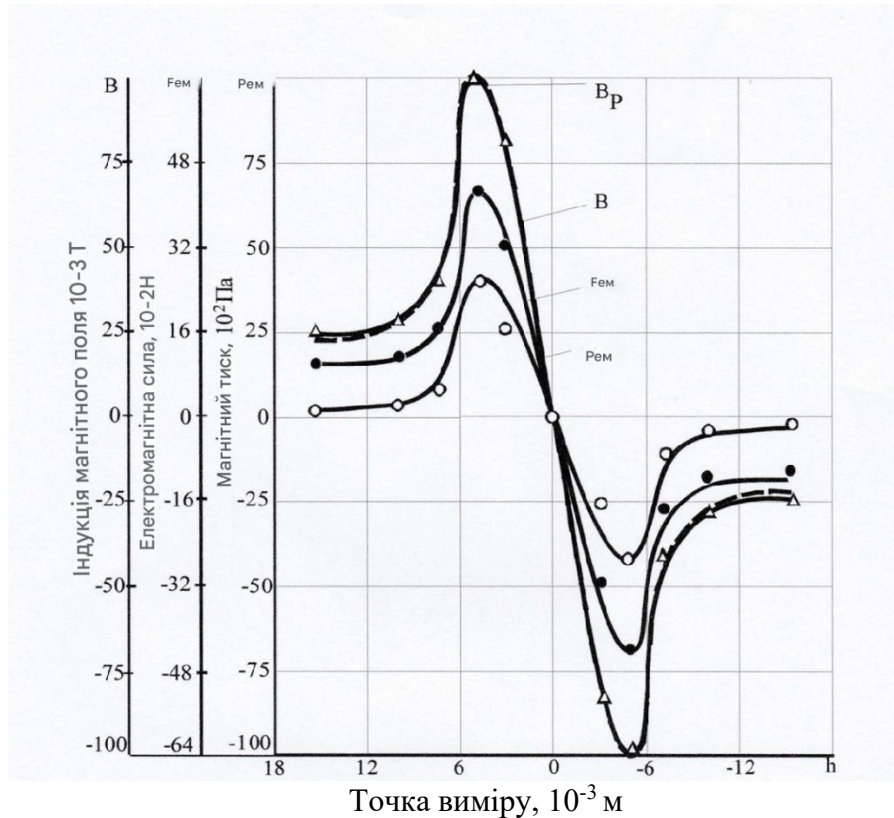


Рисунок 3 – Закономірність розподілу магнітного поля, при протіканні струму пластинами: струм 2100 А, зазор у стику $2 \cdot 10^{-3}$ м; пластини $(10 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3}$ м; B_p - розрахункове значення індукції

При віддаленні від поверхні пластини, індукція поля спочатку різко зменшується, внаслідок низької магнітної проникності повітря, а потім змінюється незначно. Відповідно до напрямку силових ліній магнітного поля, при переході від середини до нижньої поверхні пластин, напрямок індукції змінюється на протилежне.

Адекватність математичної моделі для пластин підтверджена гарною східністю розрахункових і експериментальних даних індукції магнітного поля.

Відомо, що при протіканні струму трубою без зазору, магнітне поле всередині неї дорівнює нулю. Зварювання труб виробляють із зазором у стику, що впливає на магнітне поле зварювального струму.

Розрахункові формули для визначення закономірності розподілу індукції в зазорі стику труби отримані на підставі наступних припущень: оскільки, при зварюванні товстостінних труб їх товщина 2δ більша за зазор у стику $2S$ (рис.2б), можна вважати, що деформація силових ліній магнітного поля відсутня. Отже, індукції у трубі та зазорі на кордоні феромагнетик-повітря рівні.

Тоді, індукція магнітного поля в зазорі стику визначається за теоремою о циркуляції[3],

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \frac{B}{\mu_0 \mu} l_{\text{ж}} + \frac{B}{\mu_0} l_B = \sum I_{\text{ЕЛ}}, \quad (7)$$

де, $l_{\text{ж}}$ – довжина феромагнетика, $l_{\text{ж}} = 2\pi R - 2S$, м; l_B – зазор в стику, $l_B = 2S$, м;

R – радіус труби, м; $I_{\text{ЕЛ}}$ – значення елементарного струму, що тече трубою, А.

Сума елементарних струмів, що протікають усередині контуру, що охоплюється колом з центром, що лежить на осі труби і проходить через точку $(0, y)$,

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\sum I_{эл} = \frac{I}{2\delta}(\delta + y), A, \quad (8)$$

де, 2δ – товщина стінки труби, м; y – ордината, $-\delta \leq y \leq \delta$, м.

Тоді, індукція магнітного поля в зазорі стику труби

$$B = \frac{\mu_0 \sum I_{эл}}{\frac{l_m}{\mu} + l_g} = \frac{\mu_0 \frac{I}{2\delta}(\delta + y)}{\frac{2\pi R - 2S}{\mu} + 2S}, T. \quad (9)$$

Після перетворень:

$$B = \frac{\mu_0 I (\delta + y)}{4\delta \left(\frac{\pi R - S}{\mu} + S \right)}, T. \quad (10)$$

За допомогою рівняння(10), можна розрахунковим шляхом визначити індукцію магнітного поля зварювального струму в навколодуговому просторі при різних зазорах, рівних ширині ізотерми Кюрі, режимі зварювання та струмопідведення до виробу. Достовірність математичної моделі(10) підтверджена при моделюванні процесу, шляхом пропускання струму по трубі і вимірювання індукції в зазорі стику по товщині металу та на відстані від поверхні труби. Адекватність моделі реальним умовам підтверджена у виробничих умовах, при зварюванні труб діаметром 0,426 м для газо- та нафтопровідних магістралей.

Встановлено, що при протіканні струму трубою, максимальне значення індукції зростає до 0,35 Т (рис.4), порівняно з 0,1 Т при протіканні струму по пластинах (рис.3).

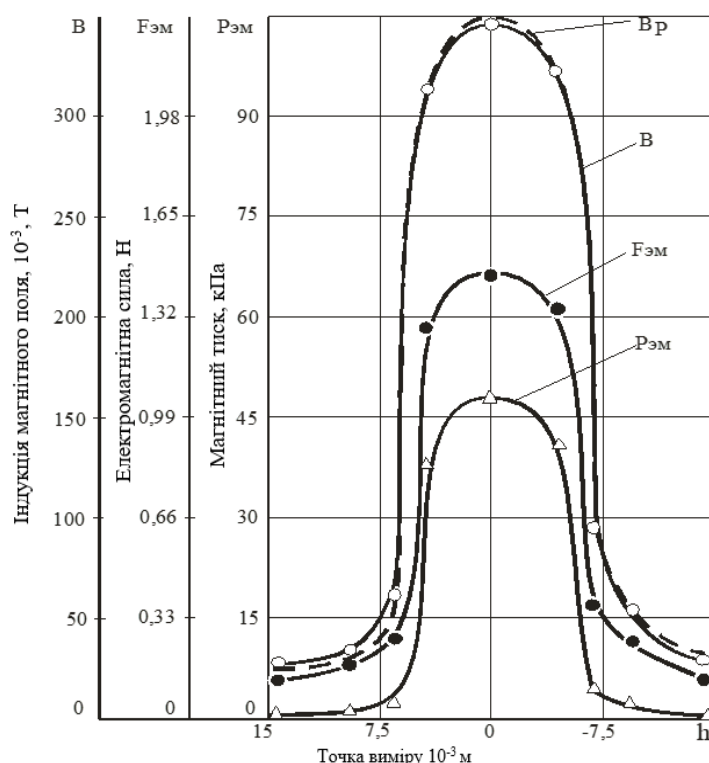


Рисунок 4 – Закономірність розподілу індукції магнітного поля при протіканні струму трубою: величина струму 2100 А; зазор в стику $2 \cdot 10^{-3}$ м;

труба $(10 \times 60 \times 300) \cdot 10^{-3}$ м; B_p – розрахункове значення індукції, з урахуванням залежності магнітної проникності від напруженості поля

Експериментально встановлено, що відносна магнітна проникність феромагнітної труби μ залежить від напруженості магнітного поля H (рис.5а). При малих значеннях, зі збільшенням H , різко зростає до 1300.

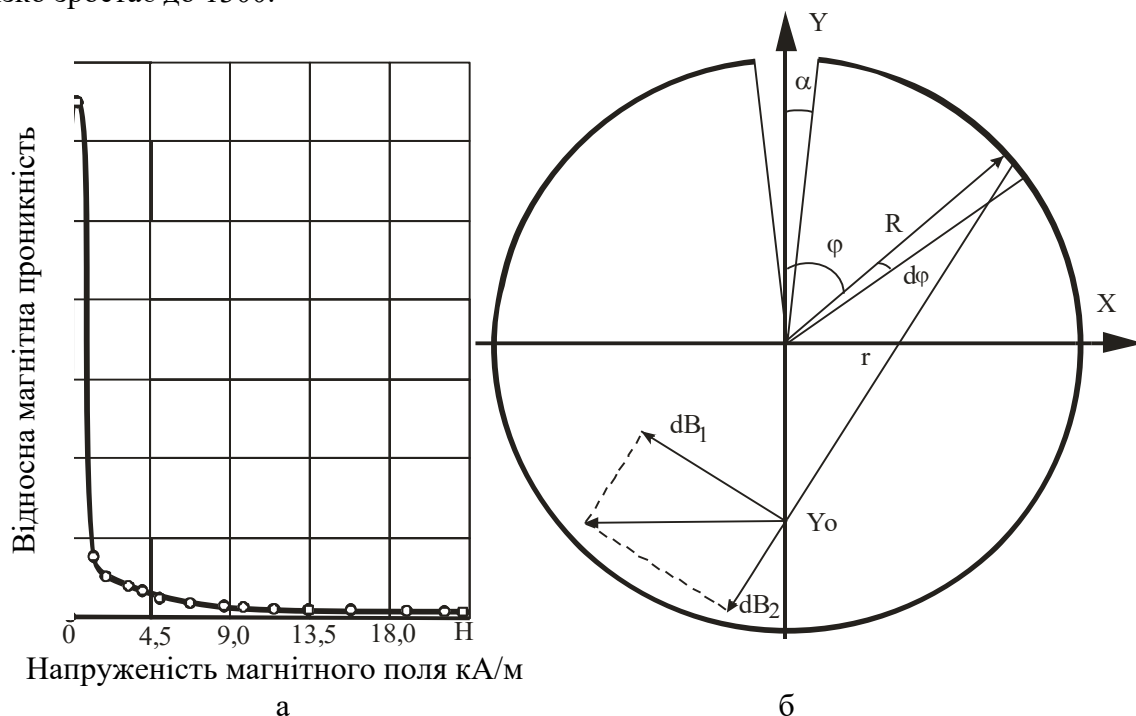


Рисунок 5 – Залежність відносної магнітної проникності феромагнетика від напруженості магнітного поля (а) та розрахункова схема індукції магнітного поля в тонкостінній трубі (б)

Потім, при збільшенні H , значення μ феромагнетика спочатку різко зменшуються до 158, а потім менш значно до 10. Без урахування залежності від H , згідно з розрахунковими даними, максимальна індукція – на поверхні труби. На внутрішній поверхні стінки труби індукція дорівнює нулю. З урахуванням залежності μ від H , максимальна індукція – в середині стінки труби, що добре узгоджується з експериментальними даними.

Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено, що при протіканні струму трубою, максимальне значення індукції різко зростає в π разів, порівняно зі зварюванням пластин:

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2r}, T. \quad (11)$$

При цьому, напрямок індукції в стику не змінюється, а максимальне значення досягається в середині стінки труби.

Індукція підвищується, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в замкнутій, що має більшу магнітну проникність феромагнітній трубі, контур якої збігається з силовими лініями поля. За межами феромагнітної труби магнітна проникність знижується, і індукція різко падає. Індукція на осі труби дорівнює нулю і має протилежний напрямок в області нижньої стінки.

Форма виробу, відповідно, впливає на електромагнітну силу $F_{EM} = IBL_D$ [3], яка підвищується з 0,42 Н, при протіканні току по пластинах, до 1,47 Н і магнітний тиск $P_{EM} = B^2/2\mu_0$, Па [2], який, при протіканні струму по трубі, зростає з 3,98 кПа до 48,8 кПа, більш ніж у 10 разів. Тому, при зварюванні труб посилюється магнітне дуття та вплив магнітного поля на формування швів. В результаті магнітного дуття, при зварюванні труб від

Машинобудування і зварювальне виробництво

струмопідведення, електромагнітна сила відхиляє дугу вперед, до обриву дуги, режим стає нестабільним, формування швів порушується.

При зварюванні на струмопідвід, дуга відхиляється назад, занурюється в основний метал і стабілізується, але шов формується з підрізами.

Для тонкостінної труби індукцію магнітного поля, що створене струмом провідності всередині труби (рис.5б), визначали згідно з принципом суперпозиції полів, що створені нескінченно довгими прямолінійними провідниками, якими протікають струми

$$dI = \frac{Id\varphi}{2(\pi - \alpha)}, A, \quad (12)$$

де, φ – кут, що визначає положення елементарної ділянки зі струмом, *рад*;

α – кут, що залежить від величини зазору в стику, *рад*.

Симетричні, щодо осі Y , струми I створюють у точці y_0 сумарне поле, спрямоване вздовж осі X , величиною

$$dB = 2\mu\mu_0 \frac{Id\varphi}{2(\pi - \alpha)} \frac{1}{2\pi r} \frac{y - y_0}{r}, T, \quad (13)$$

де, r – відстань від елементарного струму до точки $(0, y_0)$, рівне $\sqrt{(y_0 - y)^2 + x^2}$, м;

y – ордината елементарної ділянки зі струмом, м; y_0 – ордината точки, в якій вимірюється індукція, м.

Перейшовши до полярних координат, отримаємо

$$dB = \mu\mu_0 \frac{Id\varphi}{\pi - \alpha} \frac{1}{2\pi} \frac{y_0 - R\cos\varphi}{R^2 \sin^2\varphi + (y_0 - R\cos\varphi)^2} = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi(\pi - \alpha)} \frac{y_0 - R\cos\varphi}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi} d\varphi, T, \quad (14)$$

де, $x = R\sin\varphi, y = R\cos\varphi$, м.

Індукцію магнітного поля струму, що протікає по трубі, визначали інтегруванням:

$$\begin{aligned} B(0, y_0) &= \int_{\alpha}^{\pi} \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi(\pi - \alpha)} \frac{y_0 - R\cos\varphi}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi} d\varphi = \\ &= \int_{\alpha}^{\pi} \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi(\pi - \alpha)} \frac{1}{2y_0} \frac{2y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi + R^2 - R^2}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi} d\varphi = \\ &= \mu\mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \int_{\alpha}^{\pi} \left(1 + \frac{y_0^2 - R^2}{R^2 + y_0^2 - 2Ry_0\cos\varphi} \right) d\varphi = \quad , T. \quad (15) \\ &= \mu\mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left(\int_{\alpha}^{\pi} d\varphi + \frac{y_0^2 - R^2}{R^2 + y_0^2} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{d\varphi}{1 - \frac{2Ry_0}{R^2 + y_0^2} \cos\varphi} \right) \end{aligned}$$

Так як $\int_{\alpha}^{\pi} d\varphi = \pi - \alpha$, після інтегрування та перетворень маємо:

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$B(0, y_0) = \mu\mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left[\pi - \alpha + \frac{y_0^2 - R^2}{R^2 - y_0^2} \left(\pi - 2 \operatorname{arctg} \frac{R^2 - y_0^2}{(R - y_0)^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right], T. \quad (16)$$

Усереднені труби, при $y_0 \leq R$ індукція магнітного поля

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left[-\alpha + 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{R^2 - y_0^2}{R - y_0^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right], T. \quad (17)$$

За межами труби індукція магнітного поля

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left[\pi - \alpha + \left(\pi - 2 \operatorname{arctg} \frac{R^2 - y_0^2}{(R - y_0)^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right], T. \quad (18)$$

Індукція магнітного поля на значній відстані від труби, при $y_0 \gg R$

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} \left[2\pi - \alpha - 2 \operatorname{arctg} \left(-\frac{y_0^2}{y_0^2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \right] = \mu_0 \frac{I}{4\pi(\pi - \alpha)y_0} 2\pi = \mu_0 \frac{I}{2(\pi - \alpha)y_0} \quad (19)$$

Нехтуючи, у зв'язку з малим значенням, величиною α , отримаємо індукцію магнітного поля на значній відстані від труби

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I}{2\pi y_0}, T, \quad (20)$$

що є класичним виразом для прямолінійного провідника зі струмом і підтверджує достовірність отриманої формули.

З виразу (17) на осі труби, при $y_0 = 0$, індукція

$$B(0, y_0) = \mu_0 \frac{I \sin \alpha}{2\pi R(\pi - \alpha)}, T. \quad (21)$$

Згідно з виразом (21), при протіканні струму по трубі із зазором, індукція магнітного поля на осі труби не дорівнює нулю та зростає зі збільшенням зазору.

Вірогідність отриманих математичних моделей підтверджена гарною збіжністю з експериментальними даними.

Зварювання труб для газо- та нафтопровідних магістралей проводиться на мідній підкладці або флюсовій подушці, розташованій у штанзі, на яку вдягається труба. Масивна феромагнітна штанга, виготовлена зі швелерів з'єднаних листом, виконує функції несучої конструкції та струмопровідного елемента, яким тече зварювальний струм.

Для регулювання магнітного поля, при зварюванні труб, отримано рівняння індукції в трубі, при розташуванні всередині струмопровідного кабелю. На підставі принципу суперпозиції, індукція магнітного поля при протіканні струму всередині труби:

$$B = B_1 + B_2, T, \quad (22)$$

де, B_1 – індукція магнітного поля струму, що тече трубою, T ;

B_2 – індукція магнітного поля струму всередині труби, T .

Згідно з виразом (10), індукція магнітного поля струму, що тече трубою:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I (\delta + y)}{4\delta \left(\frac{\pi R - S}{\mu} + S \right)}, T.$$

Машинобудування і зварювальне виробництво

Індукція магнітного поля струму всередині труби, в зазорі :

$$B_2 = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}, T. \quad (23)$$

Тоді, індукція магнітного поля струму, що протікає по трубі і струмопровідному кабелю всередині труби, у зазорі стику виразиться рівнянням:

$$B = \mu_0 \frac{I}{8\pi^2 R \delta} \frac{2(\delta + y_0)\pi}{\left(\frac{S}{\pi R} + \frac{1}{\mu}\right)} + \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi r}, T, \quad (24)$$

де, I – величина струму, що тече трубою, A ; I_1 – величина струму, що тече всередині труби, A ; r – поточний радіус труби, m ; R – середній радіус труби, m .

За межами труби, зі струмом всередині, при $r \geq R_2$, де R_2 – зовнішній радіус труби, m , індукція магнітного поля:

$$B = \mu_0 \frac{I + I_1}{2\pi r}, T.$$

При віддаленні від струму всередині труби індукція магнітного поля зростає, внаслідок концентрації силових ліній у феромагнітній трубі. В результаті, індукція максимальна на внутрішній поверхні труби і зменшується до центру труби до нуля.

Закономірність розподілу індукції в трубі, зі струмом усередині труби, така ж, як для тіла суцільного перерізу, з протилежним напрямом силових ліній магнітного поля на верхній та нижній поверхнях. Тому, індукція магнітного поля зі струмом усередині труби, при $r \leq R_1$:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_1 r}{R_1^2} + \frac{I}{y_0} \right), T, \quad (25)$$

де, R_1 – внутрішній радіус труб, m .

Адекватність моделі реальним умовам зварювання труб підтверджено при зварюванні у виробничих умовах та моделюванні процесу.

Індукція, електромагнітна сила і магнітний тиск значно посилюються при протіканні всередині струму, напрям якого збігається з напрямком струму в трубі.

Максимальне значення індукції магнітного поля зміщується із середини до нижньої поверхні та зростає, з 0,35 Т до 0,55 Т.

Розрахункове значення індукції магнітного поля струму всередині труби, розташоване на внутрішній поверхні труби, $B=0,595$ Т, що добре узгоджується з експериментальними даними, отриманими при моделюванні.

Магнітне поле визначається струмом усередині труби. Пропорційно індукції, при протіканні всередині труби струму, напрям якого збігається зі струмом у трубі, електромагнітна сила зростає з 1,47 Н до 2,31 Н і магнітний тиск - з 49 кПа до 120 кПа.

При протіканні всередині труби струму, протилежного напрямку струму в трубі, напрям індукції змінюється на протилежне і максимум індукції - 0,375 Т зміщується до внутрішньої поверхні труби, що підтверджує домінуючу роль магнітного поля струму, що протікає всередині труби.

При цьому, створюються, з максимумом на нижній поверхні стінки труби, спрямовані вгору електромагнітна сила – 1,575 Н та магнітний тиск – 56 кПа, який при масі ванни 0,101 кг може утримувати рідкий метал від витікання з ванни при односторонньому зварюванні, що забезпечує якісне формування зворотного валика на флюсовій подушці.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Для запобігання магнітного дуття, підвищення стабільності процесу та якості зварних з'єднань на флюсовій подушці, розроблений спосіб електродугового одностороннього зварювання труб [9] (рис.6) від струмопідводу, з розташованою всередині, в безпосередньому контакті, феромагнітною трубою, при якому всередині феромагнітної труби пропускають струм, напрямом якого протилежний напрямку зварювального струму, а величину встановлюють залежно від величини зварювального струму, згідно з виразом: $I = (0,5 \div 0,6)I_1$, A ,

де, I_1 – величина струму, що тече в початок труби, A .

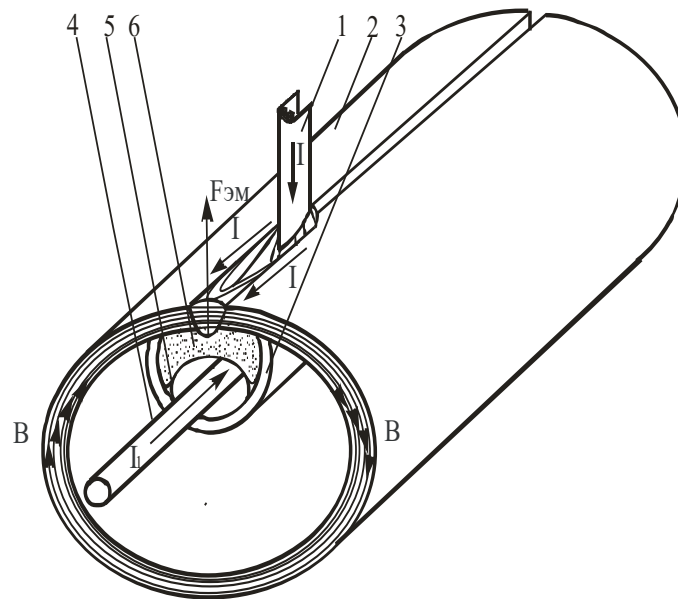


Рисунок 6 – Одностороннє високошвидкісне зварювання труб

де, 1 – складовий електрод; 2 – труба, що зварюється;

3 – феромагнітна труба усередині; 4 – струмопровідний кабель; 5 – пневмошланг;

6 – флюсова подушка

При протіканні всередині труби струму протилежного напрямку струму, який тече по трубі, згідно з принципом суперпозиції, у ванні створюється результуюче магнітне поле, напрямом якого визначається струмом всередині труби. У результаті, запобігається магнітне дуття, підвищується стабільність процесу, у ванні створюються, спрямовані вгору, електромагнітна сила і магнітний тиск, які утримують рідкий метал від витікання з ванни, що забезпечує якісне формування швів на флюсовій подушці та підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань при односторонньому високошвидкісному зварюванні.

ВИСНОВКИ

1. Отримано математичні моделі розрахунку індукції магнітного поля при зварюванні пластин та труб, адекватність яких підтверджена при моделюванні процесу та зварюванні труб для газо- та нафтопровідних магістралей. Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено вплив форми виробу на розподіл поля та індукцію, яка при зварюванні труб у π раз більше, ніж при зварюванні пластин.

2. Магнітне дуття при зварюванні труб зростає, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля у феро-магнітної труби, що володіє великою магнітною проникністю,

Машинобудування і зварювальне виробництво

підвищення індукції, електромагнітної сили, що діє на дугу і магнітного тиску, який зростає більш ніж в 10 разів.

3. Магнітне дуття особливо посилюється при протіканні всередині труби струму, напрямком якого збігається з напрямком струму, що тече трубою, згідно з принципом суперпозиції і внаслідок концентрації силових ліній поля у феромагнітній трубі. При протіканні всередині труби струму, протилежного напрямку струму в трубі, запобігається магнітне дуття, створюється магнітне поле протилежного напрямку, і виникають спрямовані вгору електромагнітні сили та магнітний тиск, які утримують рідкий метал від витікання з ванни при односторонньому зварюванні на флюсовій подушці.

4. Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання труб, при якому, за рахунок пропускання всередині феромагнітної труби струму протилежного напрямку зварювальному струму, запобігається магнітне дуття, підвищується стабільність процесу, створюються спрямовані вгору електромагнітна сила і магнітний тиск, які утримують рідкий метал від витікання з ванни, що забезпечує якісне формування швів при зварюванні на флюсовій подушці та підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

Список використаних джерел

1. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму / Р.М. Уайт. - К.: Світ, 1982. - 306с.
2. Абрамович Г.П. Прикладна газова динаміка / Г.П. Абрамович. - К.: Наука, 1989. - 824с.
3. Зільберман Г.Є. Електрика та магнетизм / Г.Є. Зільберман. - К.: Наука, 1980. - 383с.
4. Корольков П.М. Природа виникнення та методи усунення магнітного дуття при зварюванні / П.М. Корольков // Зварювальне виробництво. – 1998. – №5. – С.6–8.
5. Blakeley P.J. Magnetic arc blowcanses, effects and cures / P.J. Blakeley //Metal Construction. – 1988. – №2. – Vol.20. – P.10 – 13.
6. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 1. The origin of magnetic fields // Metal Construction. – 1984. – №7. – Vol.16. – P.441 – 445.
7. Blakeley P.J., Sanderson A. The origin and effects of magnetic fields in electron beam welding //Welding Journal. – 1984. – №1.– P.42 – 49.
8. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 2. Effects and solutions //Metal Construction. – 1984. – №8. – Vol.16. – P.496 – 500.
9. Пат.54852 А Україна, МПК В23 К 9/18 Спосіб електродугового одностороннього зварювання труб / Щетинін С.В.

Shchetynin S.V., Desiatskyi S.P.

CONTROL OF THE MAGNETIC FIELD OF WELDING CURRENT IN PIPE WELDING

The increase in pipe production is due to the rapid development of pipeline transportation of gaseous, liquid and bulk media, the further development of urban development and various branches of mechanical engineering.

The widespread use of pipes is due to the possibility of transporting various products through them and the high mechanical properties of pipes, which, despite their relatively small mass, have a significant margin of safety and high resistance to bending and twisting.

The greatest demand on the global market is for pipes for main gas and oil pipelines, which are operated at temperature fluctuations (from -40 to +50°C) and are made of carbon and low-alloy steels.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Ukraine is economically interested in transporting gas and oil through its territory and building pipelines. Therefore, it is advisable to develop new methods of welding pipes that ensure increased productivity, quality and impact strength of welded joints, reduce energy consumption, material consumption and cost of pipes.

Currently, high-quality formation of welds during one-sided welding is ensured by retaining the liquid metal of the weld pool with special linings, fluxes, copper and copper-flux pads, and a transverse magnetic field.

When welding pipes, according to the developed method, the area covered by the active spot increases, the arc pressure decreases by 4 times, which ensures high-quality formation of the return roller on the flux pad during single-sided high-speed welding, regardless of the gap in the joint.

The pattern of distribution of the magnetic field of the welding current in the weld pool, plates and pipes has been established. When the current flows through the plates, the induction in the middle of the metal thickness is zero and increases as it approaches the surface. The maximum value of the induction is located on the surface. When moving from the upper to the lower surface, the induction changes direction to the opposite.

Keywords: magnetic blast, magnetic field induction, relative magnetic permeability of ferromagnets, ferromagnetic pipe.

Стаття надійшла 08.05.2025 р.

УДК 621.179.92

doi.org/10.31498/2522-9990292025330216

Зусін А.М.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ КОЛІС МОСТОВИХ КРАНІВ З ВИКОРИСТАННЯ НАПЛАВНОГО МАТЕРІАЛУ З МЕТАСТАБІЛЬНИМ АУСТЕНІТОМ

Ходові колеса мостового крана є елементом конструкції, які найчастіше виходять з ладу та вимагають відновлення та ремонту. Причина – знос реборд коліс. Тому фахівцям у галузі підйомно – транспортного обладнання потрібно знати вимоги до вибракування ходових коліс та методи їх відновлення. Вантажопідйомні крани займають провідне місце в системі машин для механізації монтажних та вантажно-розвантажувальних робіт у будівництві. За допомогою вантажопідіймальних кранів досягаються високі темпи та індустріальність виробництва будівельно-монтажних робіт.

Кранами мостового типу називаються вантажопідіймальні крани, з вантажозахоплюючим органом, підвішеним до вантажного візка, до поворотної стріли на вантажному візку або талі, що переміщається по пересувному мосту.

До них відносяться: а) Мостові крани – крани мостового типу з безпосереднім спиранням моста на надземний крановий шлях; б) Козлові крани – крани мостового типу з опиранням моста на крановий шлях за допомогою двох опорних стійок; в) Напівкозлові крани – крани мостового типу з опиранням моста на крановий шлях з одного боку безпосередньо, а з іншого - за допомогою опорної стійки.

Зношування, що виникає під впливом різних факторів (робота просто неба, в умовах запиленості, атмосферних опадів і т.п.) при нормальній експлуатації кранів називається природним, а його результат – природним зносом. Зношування, що протікає швидко і є результатом поганого догляду, дефектів виробництва, називається аварійним, яке результат – аварійним зносом. За характером взаємодії тертьових поверхонь розрізняють механічні, молекулярно-механічні та корозійно-механічні види зношування кранів.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Вирішити проблему зношування важливе завдання, бо відновлення кранового колеса економічно вигідніше ніж покупка нового, різниця складає до п'яти разів.

Ключові слова: колеса мостових кранів, наплавлення, зносостійкість, метастабільний аустеніт, флюс.

Постановка проблеми. Один з ефективних методів відновлення зношених деталей машин та збільшення терміну служби конструкцій – це електродугове наплавлення, особливо при використанні порошкових дротів [1,2]. Даний спосіб відрізняється низкою переваг у порівнянні з іншими видами наплавлення завдяки своїй технологічній простоті, можливості варіювати хімічний склад наплавленого шару та отримувати високоякісне покриття. Сучасні розробки в цій галузі спрямовані на створення наплавних матеріалів без додавання дорогих легуючих компонентів, таких як нікель, ванадій, молібден та інші. Натомість пропонується використовувати більш доступні та поширені в Україні елементи, такі як хром, марганець, кремній та аналогічні [3], що дозволяє суттєво знизити собівартість процесу легування без втрати якості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Склад та внутрішня структура наплавленого металу визначають його функціональне призначення та здатність працювати в умовах різних видів зносу: від сухого тертя метал-метал до кавітаційного, абразивного, ударно-абразивного та корозійного. Найчастіше наплавка застосовується у випадках, коли деталі піддаються абразивному та ударно-абразивному зносу, і навіть тертю ковзання між металевими поверхнями. Більшість наукових публікацій зосереджено розробці зносостійких сплавів. Серед застосовуваних наплавних складів особливий інтерес представляють матеріали з урахуванням заліза, хрому та марганцю (Fe-Cr-Mn), оскільки вони не вимагають дорогих легуючих добавок [4]. Дослідження [5,6] свідчать про схожий вплив марганцю та нікелю на формування структури сталей, що дозволяє використовувати марганець як більш доступну альтернативу нікелю.

Існує клас наплавних сплавів, структура яких включає метастабільний аустеніт, здатний під час експлуатації під навантаженням переходити в мартенсит. Таке мартенситне перетворення виконує подвійну функцію: воно одночасно зміцнює матеріал і знижує локальні напруження, перешкоджаючи виникненню та розповсюдженню тріщин. Підбір оптимальних параметрів наплавлення та подальшої термічної обробки сприяє активізації цих структурних змін у процесі роботи, що веде до значного зростання зносостійкості [7]. Порівняно з іншими структурами, метастабільний аустеніт має високу енергоємність, завдяки чому більша частина зовнішньої енергії витрачається на фазові перетворення, а не на руйнування матеріалу.

Найбільш високі експлуатаційні характеристики демонструють хромо-марганцеві сплави. Їх властивості можна значно поліпшити легуванням, оскільки легуючі елементи спотворюють кристалічні ґрати, посилюють міжатомні зв'язки в аустеніті та стабілізують його структуру. Ці елементи сприяють утворенню дефектів упаковки, фіксують дислокації та знижують рухливість структурних осередків, що виникають при навантаженнях, тим самим підвищуючи стійкість аустеніту. Співвідношення аустенітної та мартенситної фаз, що визначає механічні властивості, безпосередньо залежить від хімічного складу сплаву та температури початку мартенситного перетворення [7].

Початкові наплавні матеріали, що забезпечують одержання шарів з метастабільним аустенітом, були розроблені у 1960-х роках під керівництвом М. І. Разікова [5]. Основою для них стала сталь марки 30X10Г10, що відрізняється високою кавітаційною стійкістю. На її базі були створені сталі аустенітного класу, такі як 20X10Г8СТ - для відновлення кранових коліс, роликів і барабанів волочилної машини, а також ПП-30X8Г8СТ - для формування аустенітно-мартенситного шару на шпинделях, хрестовинах та інших деталях.

Мета дослідження. Метою роботи є зниження витрат при відновленні коліс мостових кранів з використання керамічного флюсу при наплавленні порошковим дротом.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Основний матеріал дослідження. Процес відновлення коліс мостових кранів полягає у використанні для наплавлення порошкового дроту марки 14X12Г12СТ під шаром флюсу Record SK En-760. Для проведення досліджень було вибрано порошковий дріт 14X12Г12СТ, який дозволяє формувати метастабільний аустеніт у наплавленому металі. У процесі наплавлення аустенітних дротів часто використовується дорогий імпортований флюс Record SK-En-760. Цей флюс забезпечує гарну якість формування валиків наплавленого металу, легкість відділення шлакової кірки та запобігання утворенню шлакових включень. Однак його головним недоліком є найвища вартість. Як альтернатива, при наплавленні аустенітних дротів також застосовують вітчизняний флюс АН-26П, який відрізняється більш доступною ціною [8]. Дослідження показали, що з використанням флюсу АН-26П лежить на поверхні наплавленого металу під шаром флюсу з'являються шлакові включення (рис. 1).



Рисунок 1 – Наплавлений метал порошковим дротом 14X12Г12СТ під флюсом АН-26П

Провели експерименти, створені задля оптимізацію складу флюсу. Особлива увага приділялася вивченню можливості використання порошкового дроту 14X12Г12СТ при наплавленні із застосуванням суміші флюсів Record та АН-26П, взятих у певному співвідношенні. Для проведення цих досліджень було вибрано різні пропорції флюсів, які представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Процентне співвідношення використаних флюсів для наплавлення

Марка флюсу	Процентне співвідношення флюсів, %				
Record SK	10	20	30	40	50*
АН-26П	90	80	70	60	50*

Примітка: * патент України №94035

Наплавка була виконана при постійних режимах та умовах для кожної серії експериментів з використанням порошкового дроту під сумішню флюсів Record та АН-26П у різних співвідношеннях, на пластинах із сталі 09Г2С товщиною 30 мм. Встановлені параметри наплавлення включали силу струму в межах 300-350 А, напруга 32-35 і швидкість зварювання 35-40 м/год.

Оцінка якості наплавленого металу проводилася за такими критеріями, як форма валиків, легкість відокремлення шлакової кірки та наявність шлакових включень. Результати показали, що при співвідношенні флюсів 50% Record та 50% АН-26П отримані характеристики збігаються з результатами, досягнутими при використанні виключно флюсу Record. Додатково було проведено дослідження макроструктури та мікроструктури наплавленого металу, виміряно його твердість та проведено випробування на зносостійкість при сухому

Машинобудування і зварювальне виробництво

терті та абразивному впливі для суміші флюсів Record та АН-26П (50:50). Ці результати були порівняні з характеристиками металу, отриманого при наплавленні тільки під флюсом Record, і показали, що вони не мають значних відмінностей. Макроструктура наплавленого металу показана нижче (рис. 2)

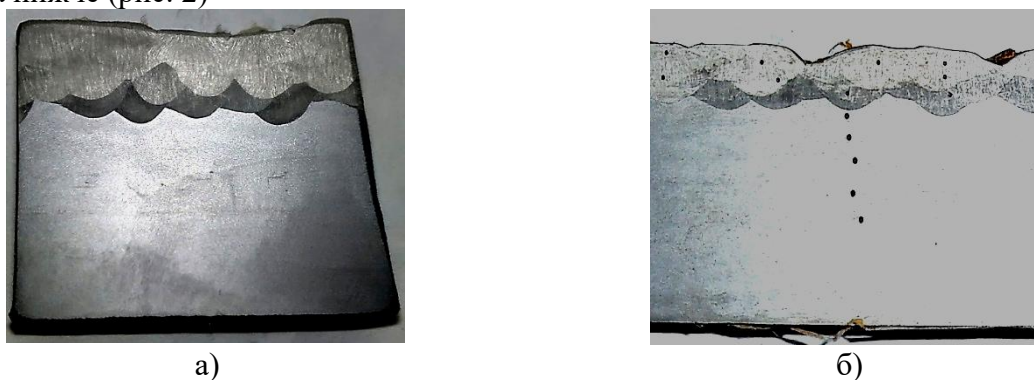


Рисунок 2 – Макроструктура наплавленого металу (x8): а) 100% Record ; б) (50:50)% Record та АН-26П

Верхній шар наплавленого металу складається з дрібнокристалічного аустеніту, який поступово переходить у мартенсит у міру наближення до зони сплавлення. Очевидно простежується межа сплавлення та основна структура металу (рис. 3). При застосуванні суміші флюсів у наплавленому металі та зоні сплавлення не спостерігається тріщин або інших дефектів, що також характерне для використання тільки флюсу Record, а також суміші флюсів у співвідношенні 50:50%.

Використання флюсу Record та його суміші з флюсом АН-26П призвело до подібних значень твердості. У поверхневому шарі наплавленого металу твердість складала 24-25 HRC, у середній частині - 27-29 HRC, а поблизу перехідної зони між основним металом і наплавленим шаром - 31-35 HRC. У зоні сплаву спостерігається різке зниження твердості до 13 HRC.

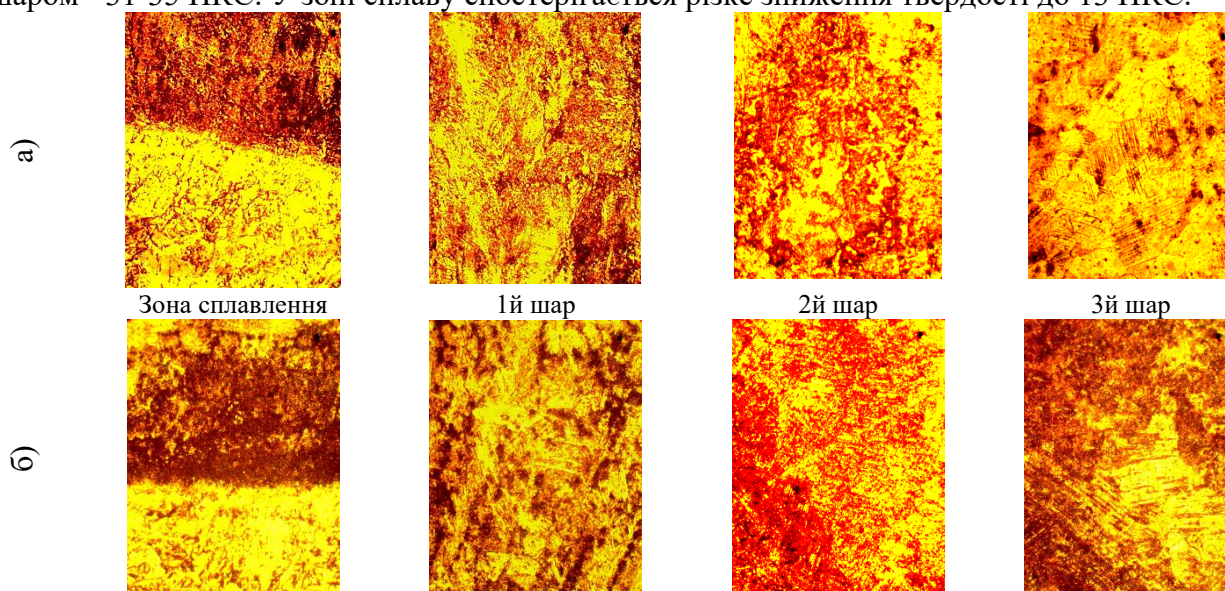


Рисунок 3 – Мікроструктура 14X12Г12СТ (x550): а) наплавка 100% Record ; б) наплавка (50:50)% Record + АН-26П

При використанні суміші флюсів не спостерігається тріщин або інших дефектів як наплавленому металі, так і в зоні сплавлення, що також характерно як для застосування тільки флюсу Record, так і суміші флюсів у співвідношенні 50:50%.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Твердість металу, наплавленого з флюсом Record та його сумішшю з флюсом АН-26П, показала схожі значення: 24-25 HRC у поверхневому шарі, 27-29 HRC у середній частині та 31-35 HRC в області переходу від основного металу до наплавленого шару. У зоні сплаву твердість різко знижується до 13 HRC.

Для оцінки схильності наплавленого металу до зміцнення при деформації було проведено випробування холодної пластичної деформації. Вдавленням загартованої кульки діаметром 10 мм на твердомірі Бринелля при навантаженні 30 кН дало можливість виміряти твердість в отриманих відбитках з наступними вимірами за Роквеллом. Результати показали, що збільшення твердості в обох випадках, як при використанні чистого флюсу Record, так і при застосуванні комбінованої суміші флюсів, відбувається однаково. Це вказує на самозміцнення металу за рахунок наклепу та динамічного мартенситного перетворення $\gamma \rightarrow \alpha'$ (рис. 4). Додаткова відпустка при температурі 650°C позитивно впливає на властивості наплавленого металу, що пояснюється дестабілізацією аустеніту та активацією деформаційного мартенситного перетворення.

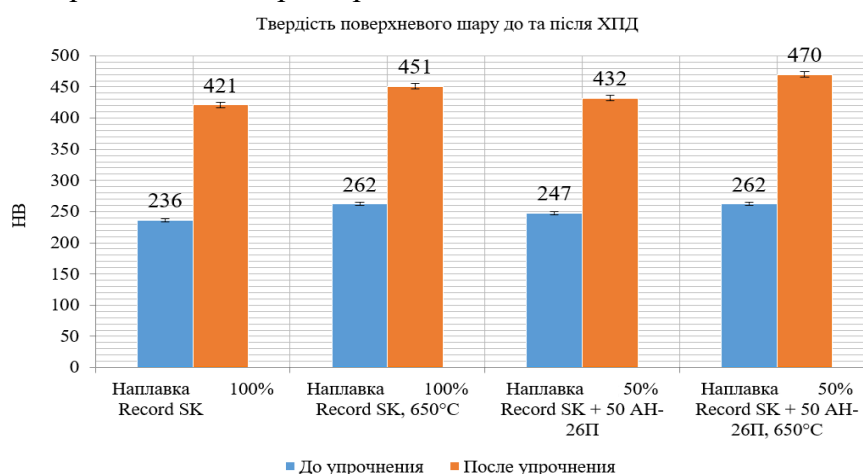


Рисунок 4 – Результати змін твердості багатошарового наплавлення, виконаного порошковим дротом 14Х12Г12СТ під сумішшю двох флюсів

Випробування на зносостійкість, що проводилися в умовах сухого тертя метал-метал (ϵ) та абразивного зносу (ϵ_a) наплавленої сталі, показали ідентичні результати для порошкового дроту 14Х12Г12СТ, наплавленого під комбінованим флюсом Record + АН-26П (рис. 5).

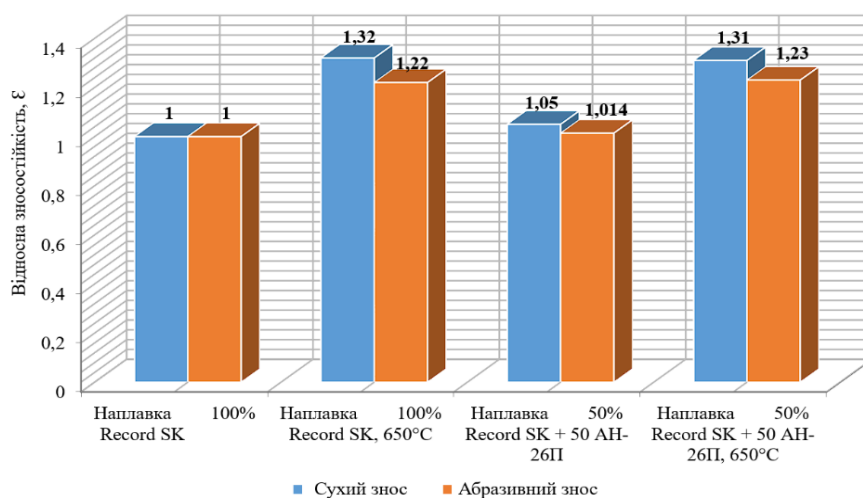


Рисунок 5 – Результати дослідження зносостійкості наплавленого металу порошковим дротом 14Х12Г12СТ

Машинобудування і зварювальне виробництво

Дослідження показали, що наплавлений метал з використанням порошкового дроту 14X12Г12СТ під сумішшю флюсів Record і АН-26П у співвідношенні 1:1 має характеристики міцності та технологічні властивості, що не поступаються металу, наплавленому тільки під флюсом Record. Це відкриває можливість знизити витрати при відновленні швидкозношуваних деталей із застосуванням аустенітних дротів. Як приклад, був розрахований річний економічний ефект від застосування даної технології наплавлення на прикладі відновлення коліс мостових кранів з використанням порошкового дроту 14X12Г12СТ.

Також було розраховано економічний ефект від впровадження розробленого складу флюсу при відновленні коліс мостових кранів. Розрахунок було проведено на основі загальновідомих витрат. Для наплавлення 1 кг проволочки потрібно 1,25 кг флюсу. Вартість флюсів становить на даний час весни 2025 року: АН26П – 106 грн/кг; Record SK En-760 – 573 грн/кг. Згідно з цих даних було розраховано економічний ефект від використання суміші флюсів: $(0,5 \times 106) + (0,5 \times 573) = 339,5$ грн за 1 кг флюсу. Економічна вигода складає в порівнянні з використанням 100% флюсу Record – 41%.

ВИСНОВКИ

Розроблена технологія наплавлення дозволяє скоротити витрати на 40% при відновленні деталей машин та конструкцій із застосуванням аустенітних дротів, при цьому не знижуючи їх експлуатаційні характеристики.

Список використаних джерел

1. Лившиц Л. С. Основы легирования наплавленного металла / Л. С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э. Г. Куркумелли // М. : Машиностроение, 1969. 188 с.
2. Рябцев И. А. Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев // К. : Екотехнология, 2004. 160 с.
3. Малинов Л.С. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Л.С.Малинов, В.Л. Малинов // Мариуполь: изд. «Рената», 2009. 568 с.
4. Малинов Л.С. Упрочнение нестабильных аустенитных Cr-Mn-N сталей / Л. С. Малинов, Т. Д. Эйсмодт // Изв. АН СССР. Металлы, 1969. №2, с. 114–120.
5. Разиков М.И. О выборе наплавочного материала, стойкого при кавитационном нагружении / М.И. Разиков, Б. А. Кулишенко // Сварочное производство. 1967. №7, с. 10–12.
6. Уманский В. Б. Упрочнение деталей металлургического оборудования / В. Б. Уманский, А. А. Костенко, Ю. Г. Худик. М.: Металлургия, 1991. 176 с.
7. Потехин Б. А. Вклад мартенситного превращения при деформации в пластичность метастабильных аустенитных сталей // ФММ. 1979. т.48, вып. 5, с. 1065–1075.
8. Думов С.И. Технология электрической сварки плавлением / С.И. Думов // Л.: Машиностроение, 1970. 456 с.

Zusin A. M.

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR THE RESTORATION OF BRIDGE CRANE WHEELS USING FILLER MATERIAL WITH METASTABLE AUSTENITE

The wheelsets of bridge cranes are structural elements that most often fail and require restoration and repair. The reason is the wear of the wheel flanges. Therefore, specialists in the field

Машинобудування і зварювальне виробництво

of lifting and transport equipment (students, workers, foremen) need to be familiar with the requirements for discarding wheelsets and methods for their restoration. Lifting cranes play a leading role in the system of machines used for mechanizing assembly and loading/unloading operations in construction. With the help of lifting cranes, high productivity rates and industrialization of construction and assembly work are achieved.

Bridge cranes are a type of lifting crane with a load-carrying mechanism suspended from the hoist trolley, which is mounted on a moving bridge. These include: a) Bridge cranes – bridge cranes with direct support of the bridge on an overhead crane track; b) Gantry cranes – bridge-type cranes with the bridge supported on the crane track by two support legs; c) Semi-gantry cranes – bridge-type cranes with the bridge supported on the crane track on one side directly, and on the other side using a support leg.

Wear, which occurs due to various factors (operation outdoors, dusty conditions, atmospheric precipitation, etc.) during normal crane operation, is called natural wear. The result of this is called natural wear. Rapid wear, which occurs due to poor maintenance or manufacturing defects, is called accidental wear, and its result is called accidental wear. Based on the nature of the interaction of friction surfaces, there are mechanical, molecular-mechanical, and corrosion-mechanical types of crane wear.

Solving the wear problem is an important task, as restoring a crane wheel is more economically advantageous than purchasing a new one, with the price difference reaching up to five times.

Keywords: Bridge crane wheels, surfacing, wear resistance, metastable austenite, flux.

Стаття надійшла 20.04.2025р.

УДК 621.3.048.1

doi.org/10.31498/2522-9990292025330217

Цокотун П.В., Капустян О.Є.

РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ ТЕРМОВАКУУМНОЇ ОБРОБКИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Ефективність роботи підприємств при сучасному рівні електрифікації залежить від стабільного електропостачання, одним з елементів якого є трансформатор. Надійна робота трансформатора зумовлена станом його ізоляції. Для відновлення діелектричних властивостей ізоляції, порушених через зволоження, трансформатори, що знаходяться на монтажі, в експлуатації та ремонті, нагріваються та сушаться. показала, що найбільш просте та зручне в експлуатації є обладнання для термовакуумної обробки. незалежно від методу, що використовується, процес сушіння виходить дорогим і енергоємним. Мета статті – запропонувати і реалізувати порядок дій для побудови математичної моделі термовакуумної обробки силових трансформаторів. Математичне моделювання враховує складну, багатошарову конструкцію трансформаторів, різні матеріали, їх теплофізичні властивості, а також особливості технологічного процесу. Активна частина розглядається як об'єкт, що складається з послідовно з'єднаних різних елементів, виготовлених з різних матеріалів, що входять до конструкції активної частини. Впровадження програми розрахунку режимів термовакуумної обробки дозволяє розробляти технологічні процеси на стадії проектування нових виробів та вдосконалювати діючу технологію термовакуумної обробки серійних трансформаторів. Запропонована методика сушіння трансформаторів, дозволяє збільшити їхню експлуатаційну надійність, обґрунтовано збільшити термін їхньої служби і, отже, здешевити їхню експлуатацію.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Проведено комплекс експериментальних робіт на полігоні, що підтвердили достовірність результатів, отриманих під час теоретичних досліджень, і показала, що запропоновані параметри є надійними для оцінки стану ізоляції трансформаторів.

Ключові слова: трансформатор, ізоляція, сушінні, математична модель, термовакуумна обробка.

Постановка проблеми. Сучасний рівень електрифікації виробництва пред'являє підвищені вимоги до надійності та якості електропостачання, раціональної експлуатації обладнання електричних мереж, застосування прогресивних методів обслуговування та ремонту. Це стосується і експлуатації трансформаторних підстанцій. Надійність електропостачання значною мірою залежить від надійності роботи трансформаторів. Однією з головних та найбільш відповідальних частин трансформаторів високої напруги, як і асинхронних двигунів [1, 2], є внутрішня електрична ізоляція, електрична міцність якої визначає надійну роботу трансформаторів. Трансформатори, як і інші електричні установки можуть надійно працювати лише зі справною ізоляцією. У процесі експлуатації через зволоження, перегріву, динамічних навантажень і перенапруг відбувається старіння ізоляції, тобто. погіршення її характеристик. Порушення ізоляції обмоток становить 67,5 % всіх аварій трансформаторів в експлуатації. Це особливо важливо на етапі експлуатації енергетичних систем, коли понад 70% основного трансформаторного устаткування вже виробило свій ресурс часу, регламентований нормативними документами. Однією з основних причин порушення ізоляції при зберіганні та експлуатації трансформаторів є її зволоження. Для відновлення діелектричних властивостей ізоляції, порушених через зволоження, трансформатори, що знаходяться на монтажі, в експлуатації та ремонті, нагріваються та сушаться [3]. Крім того, дуже часто потрібно проводити прогрівання трансформаторів перед контролем стану ізоляції, під час проведення ревізії активної частини та інших випадках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метою сушіння трансформатора є видалення вологи з ізоляційного матеріалу трансформатора, підвищення його опору ізоляції та збільшення напруги пробою.

Існують різні способи сушіння трансформаторів (наприклад, методом в індукційних втрат сталі бака, в спеціальній шафі, інфрачервоними променями, повітродувкою, у вакуумі, струмами короткого замикання та ін.) [4], низькочастотне нагрівання – процес сушіння за рахунок подачі регульованого струму низької частоти на його високовольтні обмотки [5] або комбінація методів [6, 7]. Але практика показала, що найбільш просте та зручне в експлуатації є обладнання для термовакуумної обробки. Раціональним є їх сушіння шляхом продування гарячим повітрям (до 110°C) для трансформаторів напругою до 35 кВ, або сушіння у вакуум-сушильних шафах при вакуумі (-600 Па, або ~5 мм рт. ст.) більш потужних трансформаторів. Термовакуумна обробка активних частин трансформаторів завдяки зневодненню та дегазації ізоляції забезпечує необхідну електричну міцність ізоляції і є відповідальною ланкою в циклі виготовлення високовольтних силових трансформаторів.

Однак незалежно від методу, що використовується, процес сушіння виходить дорогим і енергоємним. В результаті, при виборі відповідної процедури сушіння, основна увага приділяється часу обробки та загального споживання енергії. Цей процес не має чітких критеріїв, які характеризують ступінь сушіння ізоляції у всьому обсязі. Застосування в експлуатаційній практиці найбільш точних способів розрахунку параметрів нагрівання та сушіння дозволить знизити витрати, прискорити введення трансформаторів у роботу.

В роботі [8] розглянута спрощена модель аналітичного описання процесу сушки ізоляції трансформаторів струму при обдуванні гарячим повітрям вакуумного або глибоковакуумного сушіння, що дозволяє оцінити вологість ізоляції у будь-який момент часу з використанням нескладного математичного алгоритму.

При сушінні ізоляції трансформаторів виникає завдання розрахунку необхідних режимів

Машинобудування і зварювальне виробництво

нагрівання оброблюваних виробів. Специфікою такої задачі часто є локалізація нагріву в області поверхні виробу. Це, в загальному випадку, відрізняє дані технологічні установки від печей і не дозволяють використовувати для розрахунку та проектування апробовані методики, що застосовуються при розрахунку печей.

Таким чином, розрахунок для вакуумно-термічного обладнання вимагає розробки спеціальної методики, що дозволяє визначати температури взаємодіючих поверхонь при заданих потужних характеристиках технологічного процесу, що реалізується, або необхідні потужнісні характеристики технологічної установки для необхідного розподілу температур з урахуванням геометрії системи та теплофізичних характеристик її елементів.

Мета дослідження. запропонувати і реалізувати порядок дій для побудови математичної моделі термовакuumної обробки силових трансформаторів, що дозволяє розрахувати необхідні характеристики для забезпечення регульованої зміни температури поверхонь, що беруть участь у теплообміні. Оцінити точність та ефективність методу, дати рекомендації щодо його застосування.

Завдання дослідження: отримання розрахункових залежностей визначення значень параметрів, щоб забезпечити реалізацію необхідного режиму термообработки;

отримання експериментальних даних у вакуумно-термічних установках з локальним розподілом температур та їх зіставлення з результатами розрахунків за розробленими математичними моделями з визначенням похибок розрахунків.

Основний матеріал дослідження. Експериментальні дослідження проведені на силових трансформаторах, що діють, з використанням сучасного діагностичного обладнання. Достовірність отриманих результатів базується на коректному застосуванні теорії теплопередачі, збігу результатів розрахунків з експериментальними даними, використанні при проведенні експериментів сучасних повірених вимірювальних засобів та стандартних методик вимірювань, адекватності та несуперечності використовуваних моделей.

Основними параметрами процесу термовакuumної обробки є температура, залишковий тиск, тривалість фази прогріву і фази глибоковакуумного сушіння. Температура та залишковий тиск визначаються дослідженнями і залежать від властивостей матеріалів та особливостей обладнання.

Тривалість фази прогріву і фази глибоковакуумного сушіння трансформаторів в даний час визначається у період авторського нагляду за головними зразками і ґрунтується на методах непрямого контролю за станом ізоляції, тому що для отримання даних по кінетиці прогріву та сушіння ізоляції трансформаторів, вивчення розподілу температур і залишкового вмісту вологи в ізоляції по всій товщині, необхідно виконувати серію тривалих і дорогих досліджень на великомасштабних моделях, практично рівних трансформаторам.

Для розробки технологічних регламентів термовакuumної обробки з конструкторської документації на трансформатор створена математична модель, яка описує процес і розроблена методика розрахунку процесу термовакuumної обробки.

Математичне моделювання враховує складну, багат шарову конструкцію трансформаторів, різні матеріали, їх теплофізичні властивості, а також особливості технологічного процесу. Активна частина розглядається як об'єкт, що складається з послідовно з'єднаних різних елементів, виготовлених з різних матеріалів, що входять до конструкції активної частини.

У процесі термовакuumної обробки активна частина трансформатора отримує тепло з навколишнього середовища за рахунок випромінювання та теплообміну в режимі вільної конвекції.

З [9] процеси тепломасопереносу пов'язані співвідношеннями:

$$\bar{q} = -\lambda \text{grad } t; \quad (1)$$

Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\bar{V} = -K_p \text{grad } P, \quad (2)$$

де $\bar{q}$ – тепловий потік, Вт/м²;

$\bar{V}$ – масовий потік, кг/(м²×с);

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м×с);

K_p – ефективний коефіцієнт переносу пари в капілярно-пористому тілі, кг/(м×с×Па);

t – температура, °С;

P – парціальний тиск в камері, Па.

Стан зв'язаної вологи в целюлозній ізоляції описується законом Френдліха:

$$U(t) = a \exp(-b \times t) P^{(k+d \times t)}, \quad (3)$$

де a , b , k , d – емпіричні коефіцієнти, абсолютні значення для кожного електроізоляційного матеріалу із [1];

$U(t)$ – вологовміст в ізоляції, %.

На основі рівнянь (1) – (3) та класичних задач теплопровідності [10] розроблена математична модель фази прогріву і сушіння активних частин трансформаторів.

У безрозмірних змінних математичний описання моделі має вигляд:

$$\frac{\partial \theta}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}; F_0 > 0, x \in [0, 1] \quad (4)$$

з початковими та граничними умовами:

$$\theta |_{F_0 = 0} = 0; \quad (5)$$

$$\theta |_{x = 1} = 1 - \exp(-BiLF_0); \quad (6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} |_{x = 0} = Bi(\theta - 1). \quad (7)$$

Вирішуючи завдання (4) – (7) за допомогою операційного обчислення, отримуємо значення безрозмірної температури в будь-якій точці фази в різні моменти безрозмірного часу:

$$\theta = \varphi(Bi, L, F_0, x), \quad (8)$$

де θ – безрозмірна температура;

F_0 – число Фур'є (узагальнений час);

L – відносний розмір;

Bi – критерій Біо.

Перехід до розмірної температури та часу здійснюється через залежності [10]:

$$t_{(x,\tau)} = t_0 + \theta(t_c - t_0); \quad (9)$$

$$\tau = \frac{F_0 \times l^2}{a}, \quad (10)$$

де t_0 – температура в початковий момент часу, чисельно дорівнює 20° С;

t_c – температура середовища, чисельно рівна 115°С;

$t_{(x,\tau)}$ – температура в будь-якій точці фази по часу, °С;

a – коефіцієнт температуропровідності, чисельно рівний $79,8 \times 10^3$ м²/с;

l – характерний розмір, м;

τ – час, с.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Розрахунок процесу термовакуумної обробки здійснюється в два етапи: розрахунок зміни температури і вмістологи в часі для фази прогріву і розрахунок зміни полів температур, тисків і вологовмісту для глибоковакуумного сушіння.

Вихідними даними для розрахунку тривалості етапу прогріву крім теплофізичних коефіцієнтів, що характеризують властивості матеріалів, є геометричні розміри конструкції, температура процесу, початкова температура ізоляції, початковий вмістологи ізоляції, маса електрокартону, кабельного паперу, міді, кількість електрокартонних бар'єрів, рейок, повітряних проміжків на фазу активної частини трансформатора [9].

Виходячи з оптимальних умов закінчення етапу прогрівання [9] (температура ізоляції 85°C, залишок вмістуологи 2 %), визначається його тривалість і дільниця ізоляції (дільниця, що важко прогрівається має найменшу температуру і найбільший вмістологи у момент закінчення прогріву).

Вихідними даними для розрахунку тривалості глибоковакуумного сушіння є температура і вмістологи ділянки, що важко прогрівається, його висота і заданий кінцевий вмістологи ізоляції, який залежить від класу напруги виробу.

Необхідна інформація для розрахунку t та U досвідченим співробітником підбирається трохи більше 3 год.

В даний час як лінії електропередачі в основному використовуються лінії напругою 110 кВ і вище, а як розподільні - лінії напругою 35 кВ і нижче. Трансформатори 110 кВ найчастіше використовуються в системах електропостачання для перетворення напруги передачі 110 кВ напруга розподілу 35 кВ, 20 кВ або 10 кВ, для використання користувачами або трансформаторами суспільного розподілу. Великі споживачі електроенергії також використовують трансформатори на 110 кВ як користувальницькі трансформатори. Малі електростанції також використовують напругу 110 кВ як мережеву напругу, тому трансформатор 110 кВ використовується як підвищуючий трансформатор. Виконано низку розрахунків режимів термовакуумної обробки для трансформаторів класу напруги 110 кВ і вище і проведено порівняння з експериментальними даними.

Наприклад на рис. 1 та 2 показані результати розрахунку прогріву силового високовольного трансформатора. З рис. 1 слід, що до кінця прогріву дільниця ізоляції, що знаходиться в зоні точки 6 радіального розміру фази активної частини, має мінімальну температуру (85°C) і максимальний вмістологи (2%).

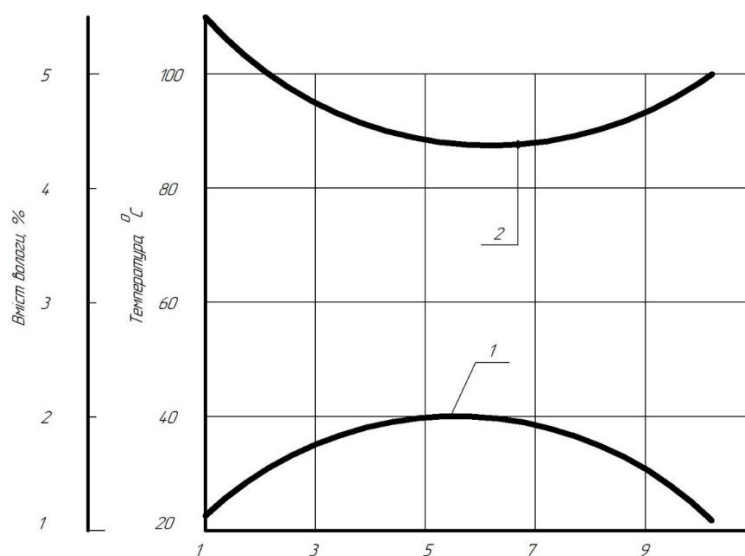


Рисунок 1 – Розподіл вологовмістів (1) та температур (2) в ізоляції активної частини в кінці прогріву

Машинобудування і зварювальне виробництво

Відповідно до прийнятої методики дану дільницю слід віднести до важкопрогріваємої, яка визначає тривалість прогріву.

З рис. 2 видно, що для досягнення заданих параметрів, прогрів активної частини трансформатора повинен продовжуватися впродовж 125 год. За даними експерименту тривалість прогріву становила 120 год. Отримана розбіжність результатів незначна.

Запропонована методика сушіння трансформаторів, дозволяє збільшити їхню експлуатаційну надійність, обґрунтовано збільшити термін їхньої служби і, отже, здешевити їхню експлуатацію. Проведено комплекс експериментальних робіт на полігоні, що підтвердили достовірність результатів, отриманих під час теоретичних досліджень, і показала, що запропоновані параметри є надійними для оцінки стану ізоляції трансформаторів.

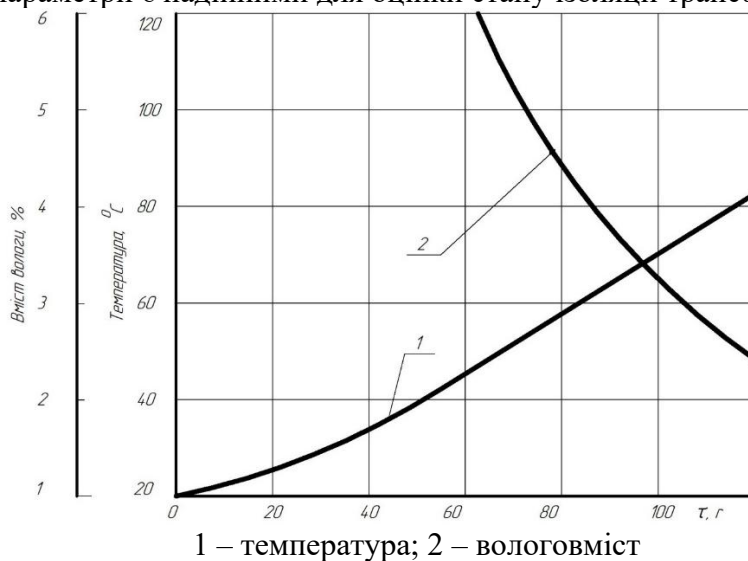


Рисунок 2 – Кінетика прогріву важкопрогріваємої дільниці ізоляції активної частини

ВИСНОВКИ

Запропоновано методику розрахунку режимів термовакuumної обробки силових трансформаторів.

Впровадження програми розрахунку режимів термовакuumної обробки дозволяє розробляти технологічні процеси на стадії проектування нових виробів та вдосконалювати діючу технологію термовакuumної обробки серійних трансформаторів.

Список використаних джерел

1. Банин Р. В. Разработка устройства токовой сушки изоляции обмоток асинхронных двигателей // Вестник КГУ, 2010. №1. – С. 78-84.
2. Банин Р. В. Совершенствование способа повышения эксплуатационной надежности асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве // Достижения науки и техники АПК, 2010. №10 – С. 71-73.
3. Сушка электрических машин и трансформаторов / И.П. Алякритский и др. – М.: Энергия, 1974. – 72 с.
4. Сивак Ю. П. Сучасні методи сушіння ізоляції трансформаторів [Електронний ресурс] / Ю. П. Сивак, Ю. В. Малогулко // Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р. – Електрон. текст. дані. – 2019. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2019/paper/view/7045>
5. Риндлісбахер Г., М. фон Ах Сушка трансформаторов // АББ Ревю 3/2005 С. 66-69.

Машинобудування і зварювальне виробництво

6. Сердешнов А. П., Усов Г. Г. Сушка твердой изоляции силовых трансформаторов комбинированным методом //Агропанорама. – 2000. - С.32-35.
7. Пат. 713 879 RU, МПК (2006) H02K 15/00. Устройство для сушки силовых трансформаторов в полевых условиях сельских электрических сетей / Богатырев Н.И., Оськин С. В., Ефанов А. В., Миргородский А. В. ; Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. –№ 2019125885; заявл. 15.08.2019; опубл.: 10.02.2020, Бюл. № 4. – 14 с.
8. Рассальский А.Н., Солодуненко Д.В. Математическая модель процесса сушки изоляции трансформаторов тока // Електротехніка і Електромеханіка. 2003. №2 – С. 53-54.
9. Куц П.С., Пикус И.Ф. Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции. Минск: Наука и техника, 1979. – 33 с.
10. Теорія теплопровідності: підручник: підручник. для студ. спец. 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / А. В. Гільчук, А. А. Халатов, Т. В. Доник; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 131 с.

Tsokotun P.V., Kapustian O.Ye.

CALCULATION OF THERMAL VACUUM TREATMENT MODES FOR POWER TRANSFORMERS

The efficiency of enterprises at the current level of electrification depends on a stable power supply, one of the elements of which is a transformer. Reliable operation of a transformer is determined by the state of its insulation. To restore the dielectric properties of the insulation, which are damaged due to moisture, transformers that are under installation, operation and repair are heated and dried. showed that the simplest and most convenient to operate is equipment for thermovacuum treatment. Regardless of the method used, the drying process is expensive and energy-intensive. The purpose of the article is to propose and implement a procedure for building a mathematical model of thermovacuum treatment of power transformers. Mathematical modeling takes into account the complex, multilayer structure of transformers, heterogeneous materials, their thermophysical properties, as well as the features of the technological process. The active part is considered as an object consisting of series-connected heterogeneous elements made of different materials that are part of the design of the active part. The implementation of the program for calculating the thermal vacuum treatment modes allows developing technological processes at the design stage of new products and improving the existing technology of thermal vacuum treatment of serial transformers. The proposed method of drying transformers allows increasing their operational reliability, reasonably increasing their service life and, therefore, reducing the cost of their operation. A set of experimental works was carried out at the test site, which confirmed the reliability of the results obtained during theoretical studies and showed that the proposed parameters are reliable for assessing the state of transformer insulation.

Keywords: transformer, insulation, drying, mathematical model, thermal vacuum treatment.

Стаття надійшла 18.05.2025р.

Попов С.М., Капустян О.Є.

АЛГОРИТМ БАГАТОФАКТОРНОГО ЧИСЕЛЬНОГО МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ МАСОГАБАРИТНИХ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

В роботі представлена концепція багатофакторного системного підходу при оптимізації норм витрати матеріалів електричних зварювальних реакторів з урахуванням чисельних методів. Показано, що загальні складові витрат виражаються через розміри зварювальних трансформаторів, реакторів та електромагнітні навантаження (щільність струму в обмотках, індукцію в сталі), що надалі дозволить знайти характеристики, що забезпечують поєднання оптимальних конструктивних параметрів електрообладнання та їх можливого номінального та пікового навантаження. У той же час, завдання аналітичної оптимізації є досить складним і трудомістким, тому раніше при її вирішенні не уявлялося можливим враховувати ряд важливих факторів, не пов'язаних простою аналітичною залежністю, яка б визначала цінову оцінку в залежності від технологічності, надійності, стійкості при коротких замиканнях, здатності навантаження і інших факторів. Критерієм оптимізації була обрана мінімізація витрат на виготовлення та експлуатацію реактора при заданих споживчих властивостях (визначених замовником), з урахуванням потужності реактора, класу ізоляції, характеру нелінійності, стійкості при КЗ, терміну служби та ін. Розрахунки здійснювали з використанням математичного пакету MathCAD.

Показано, що визначення оптимальних параметрів трифазного ярмового зварювального реактора шляхом застосування напівемпіричних коефіцієнтів призводить до отримання усереднених значень, що зумовлює додаткові витрати активних матеріалів. Розроблено структурно-аналітичну схему проектного синтезу електричних реакторів. Отримано залежність мас і відповідних цих мас електричні втрати при мінімумі цільової функції для заданого індуктивного опору реактора.

Ключові слова: реактор для зварювання, цільова функція, чисельна оптимізація, магнітопровід, обмотка.

Постановка проблеми. Розвиток світових ринків зварювального обладнання (США, Китай, ФРН, Великобританія, Франція, Україна та ін.) зумовлює жорстку конкуренцію, забезпечуючи просування виробів з мінімальною собівартістю, а також найменшою сумою початкових капітальних вкладень з урахуванням нормативних коефіцієнтів з амортизації та запланованих витрат на експлуатацію [1,2].

Таким чином, стає очевидно, що загальні складові витрат необхідно виразити через розміри зварювальних трансформаторів, реакторів та електромагнітні навантаження (щільність струму в обмотках, індукцію в сталі), що надалі дозволить визначити характеристики, що забезпечують поєднання оптимальних конструктивних параметрів електрообладнання та їх можливої номінальної та пікових навантажень. У той же час, завдання аналітичної оптимізації є досить складним і трудомістким, тому раніше при її вирішенні не уявлялося можливим враховувати ряд важливих факторів, не пов'язаних простою аналітичною залежністю, яка б визначала цінову оцінку в залежності від технологічності, надійності, стійкості при коротких замиканнях, здатності навантаження і інших факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналітичні методи розрахунку параметрів трансформаторів докладно викладено у книгах П.М. Тихомирова [1] та ін. Оптимізація трансформаторів також розглядається в інших публікаціях, наприклад [2-6]. При цьому

Машинобудування і зварювальне виробництво

необхідно відзначити спрощений характер розв'язання задач аналітичної оптимізації, оскільки її концепція лежить у максимально можливому скороченні чисельних параметрів, що зумовлює одержання свідомо закруглених та узагальнених масогабаритних показників електротехнічних пристроїв. Це стосується таких важливих факторів, як характер нелінійності, стійкість при КЗ, здатність навантаження і т.д. Оптимальні співвідношення розмірів реактора у вигляді круглої циліндричної обмотки без сталі визначив Максвелл. Півстоліття тому Хак побудував діаграми надмірної витрати матеріалів при відхиленні розмірів таких реакторів від оптимальних, що наведені в [5]. У [4] дано метод оцінки параметрів реакторів без сталі для випадків, коли розміри визначаються вимогами до електродинамічної стійкості або активного опору.

При оптимізації реактора в існуючих методиках [6-8] приймаються заздалегідь відомими та незмінними наступні коефіцієнти та параметри:

1. коефіцієнти заповнення обмотки (або вікна магнітопроводу) проводом $k_{об}$ та магнітопроводу сталлю $k_{ст}$;
2. коефіцієнти додаткових втрат $k_{Роб}$ (відношення повних втрат в обмотках та додаткових в елементах конструкції до основних);
3. $k_{Рст}$ (відношення повних втрат у магнітопроводі до основних втрат у сталі);
4. коефіцієнти маси (відношення складових повної маси до маси відповідних активних матеріалів);
5. коефіцієнт потокозчеплення k_{ψ} (відношення середнього потоку в витках обмотки до найбільшого потоку в стрижні або ярмі магнітної системи);
6. середні ціни.

Таким чином, встановлено, що в раніше запропонованих алгоритмах оптимізації, як правило, вважають заздалегідь відомими та постійними коефіцієнти заповнення, відношення додаткових втрат до основних, ціни матеріалів та вартість їхньої переробки тощо. Однак, самі ці параметри є змінними факторами і в залежності від конкретних умов експлуатації значною мірою можуть впливати на оптимізацію матеріалів і техніко-економічних характеристик обладнання в цілому. Крім цього необхідно розуміти, що в існуючих методах, пропонується вирішувати завдання оптимізації на основі аналітичних функцій, при цьому система рівнянь, заснована на приватних похідних цільової функції, як правило, має дробові показники ступеня, що практично обумовлює неможливість аналітичного рішення.

Мета дослідження. Розробка алгоритму багатофакторного чисельного методу оптимізації масогабаритних та електричних параметрів зварювальних реакторів.

Основний матеріал дослідження. Створення системного підходу передбачає розробку системного багатофакторного методу оптимізації електричних реакторів, який був би зручний у використанні, і давав би більш точні результати порівняно з існуючими аналітичними розрахунками та методиками, що базуються на переборі існуючих варіантів. У цьому дуже важливим є створення умов, коли необхідні технічні чи інші обмеження, можна було б ставити як умови безпосередньо у програмі розрахунку.

Уявимо (рис. 1) алгоритм вирішення задачі пошуку оптимальної конструкції (проектного синтезу) електричного реактора у вигляді структурно-аналітичної схеми.

Практично для всіх типів електричних реакторів підійде вираз цільової функції представлений у вигляді суми трьох членів, пропорційних масі дроту обмотки $G_{об}$ і сталі магнітопроводу $G_{ст}$, втрат в обмотці та магнітопроводі P_{Σ} :

$$C(X) = C_{об}G_{об}(X) + C_{ст}G_{ст}(X) + C_nP, \quad (1)$$

де $C_{об}$, $C_{ст}$ – вагові коефіцієнти, що визначають початкові вкладення у вартість матеріалів та виготовлення обмотки й магнітної системи;

C_n – ваговий коефіцієнт, що визначає експлуатаційні витрати, пов'язані із втратами електроенергії;

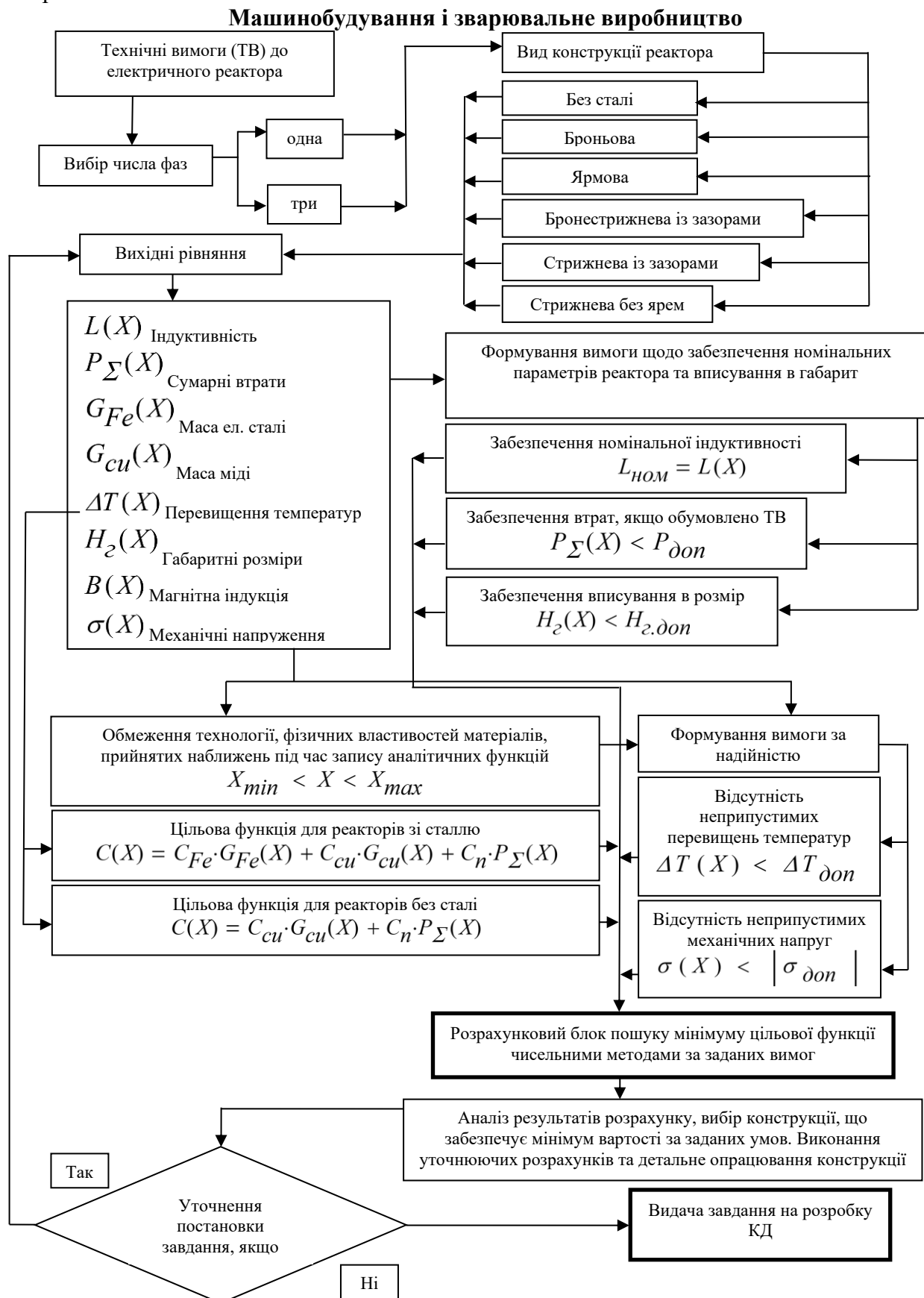


Рисунок 1 – Структурно-аналітична схема проектного синтезу електричних реакторів

Машинобудування і зварювальне виробництво

$X = (X_1, X_2, X_3 \dots)$ – вектор геометричних розмірів реактора (діаметр, висота обмотки і т.д.) та електромагнітних навантажень (щільність струму в обмотці, індукція сталі), оптимальне співвідношення компонент якого визначає екстремум цільової функції. При цьому частина вектора X може бути визначена заданим класом напруги, для якого відомі ізоляційні проміжки. Практично всі основні параметри реактора виражаються аналітичними функціями від вектора X , тому для забезпечення умов технічного завдання вектор X накладається цілий ряд умов, які суттєво обмежують область визначення вектора.

Розрахункова індуктивність $L(X)$ повинна дорівнювати номінальній індуктивності $L_{ном}$ заданою технічним завданням:

$$L_{ном} = L(X) \quad (2)$$

Вимоги щодо надійності визначаються відсутністю перевищення допустимих градієнтів температур в елементах конструкції реактора та відсутністю перевищень допустимих механічних напружень у матеріалі за заданих умов роботи.

$$\begin{cases} \Delta T(X) < \Delta T_{доп} \\ \sigma(X) = \sigma_{доп} \end{cases} \quad (3)$$

Максимальні сумарні втрати також можуть бути обумовлені вимогами контракту та не повинні перевищувати допустимих значень.

$$P_{\Sigma}(X) < P_{доп} \quad (4)$$

Цілий ряд обмежень на вектор X накладають вимоги існуючих технологій (розміри оснащення, транспортні габарити і т.д.), а також фізичні властивості матеріалів, що використовуються, наприклад магнітна індукція в сталі, електроізоляційні властивості ізоляції та ін. Також є обмеження, пов'язані з припущеннями під час запису аналітичних виразів індуктивності реактора.

$$X_{min.доп} < X < X_{max.доп} \quad (5)$$

Чисельні методи вимагають використання вектора наближених значень початку першого кроку ітерації X_0 . Найкраще використовувати дані існуючого прототипу, таким чином підставляючи дані прототипу X_0 у виразі (1-6) ми можемо перевірити правильність запису відповідних аналітичних виразів.

У такій постановці завдання пошуку значень вектора X , при якому цільова функція досягає свого мінімуму і відповідно досягається мінімізація витрат на виготовлення та експлуатацію реактора, є класичним завданням нелінійної оптимізації, математичний апарат якої добре розроблений.

Використовуючи метод сполучених градієнтів або квазіньютонівський метод, можна досить швидко вирішити поставлене завдання. Таким чином, критерієм оптимізації є мінімізація витрат на виготовлення та експлуатацію реактора при заданих споживчих властивостях (визначених замовником), з урахуванням потужності реактора, класу ізоляції, характеру нелінійності, стійкості при КЗ, здатності навантаження, терміну служби та ін.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Це можливо при розробці нової концепції вирішення задач оптимізації норм витрат електротехнічних матеріалів на основі числових методів. Крім цього необхідно вести облік масогабаритних показників залежно від електромагнітних навантажень.

Для цього, висловивши складові витрат на виготовлення та експлуатацію реактора у вигляді аналітичної функції від геометричних розмірів реактора та електромагнітних навантажень (щільність струму в обмотці, індукція в сталі), необхідно розрахувати цільову функцію, екстремум якої відповідатиме мінімальним витратам електротехнічних матеріалів обладнання (реактора).

Розглянемо задачу оптимізації аналітичними методами на прикладі найбільш поширеного трифазного зварювального ярмового реактора, який має три котушки без феромагнітних стрижнів, розміщені між феромагнітними площинами (рис. 2).

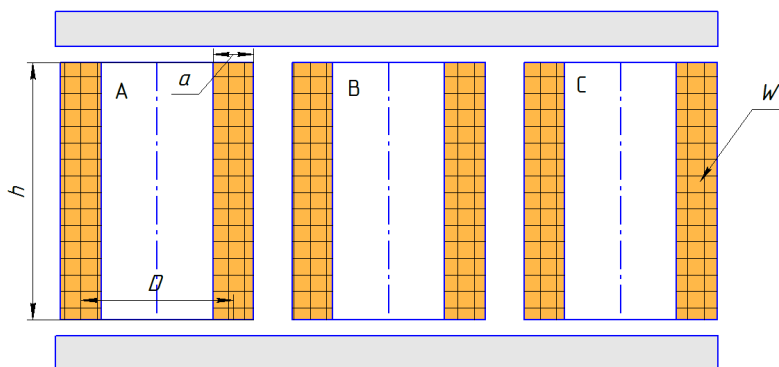


Рисунок 2 – Конструкція трифазного ярмового реактора

Спочатку задаються вихідні дані – індуктивне опір реактора X і коефіцієнт заповнення обмотки міддю K_z , що враховує наявність ізоляційних проміжків в обмотці. Коефіцієнт заповнення обмотки міддю може змінюватись в залежності від класу напруги та типу ізоляції реактора та електричним струмом I . Також додатково задається магнітна індукція в ярах, з урахуванням можливих кидків струму B_y , ізоляційні відстані між котушками δ_k , відстань між ярмом і котушкою на дві сторони h_0 . Виконаємо мінімізацію цільової функції методом Ньютона з використанням математичного пакету MathCAD [8].

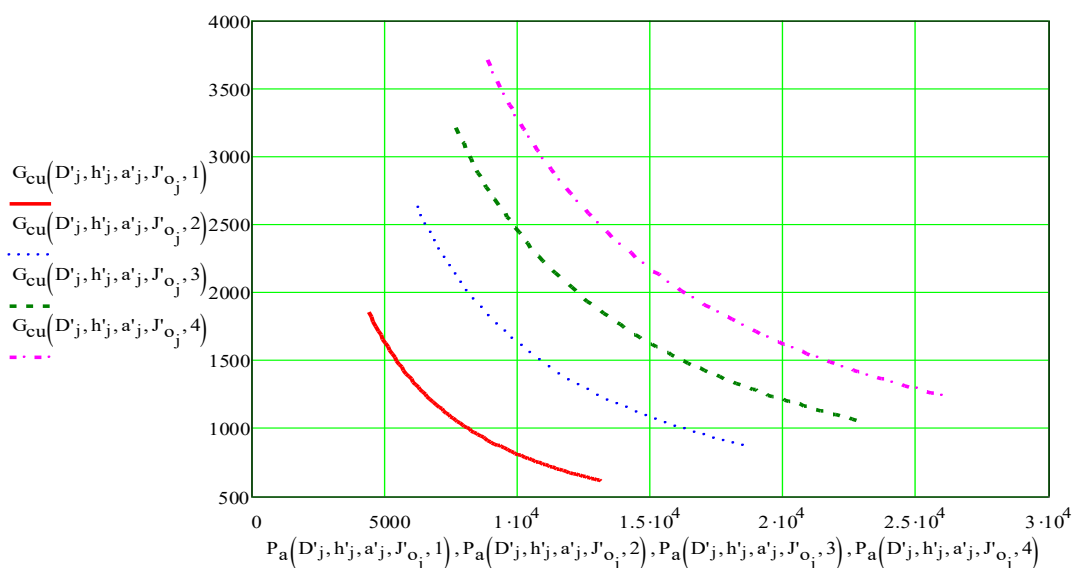


Рисунок 3 – Залежність маси сталі ярем обмотки від омічних втрат в обмотках та необхідного реактивного опору

Машинобудування і зварювальне виробництво

Рішення, в якому мінімізується маса міді реактора (рис. 3, 4) при заданій щільності струму та індуктивному опорі:

$$M(J_o, X) = \text{Minimiz}(G_{Cu}, D, h, a). \quad (6)$$

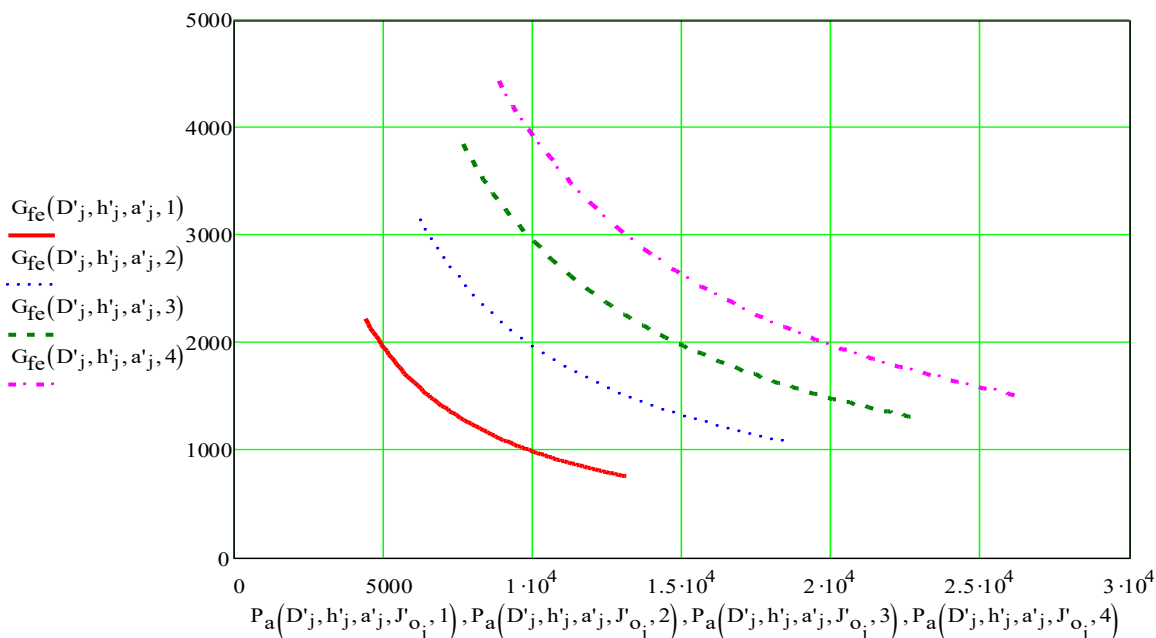


Рисунок 4 – Залежність маси міді обмотки від омичних втрат в обмотках та необхідного реактивного опору

ВИСНОВКИ

1. Аналіз результатів досліджень показав, що визначення оптимальних параметрів трифазного ярмового зварювального реактора шляхом застосування напівемпіричних коефіцієнтів призводить до отримання усереднених значень, що зумовлює додаткову витрату активних матеріалів.

2. Розроблено системний багатофакторний метод чисельної оптимізації масогабаритних та електричних параметрів зварювальних ярмових реакторів, основою якого є модернізована цільова функція.

3. Отримано залежності маси сталі ярем і міді обмотки, а також середнього діаметра, висоти та радіального розміру обмотки від омичних втрат у них та нормованої індуктивності, що дозволяють отримати оптимальні співвідношення масогабаритних та електричних показників у зварювальному ярмовому реакторі.

Список використаних джерел

1. Рымар С.В. Оптимизация трансформатора с развитыми ярмовыми магнитными потоками рассеяния / С.В. Рымар // Автоматическая сварка. – 2005. – № 7. – С. 32-35.
2. Рымар С.В. Оптимизация трансформатора с развитыми поперечными магнитными потоками рассеяния / С.В. Рымар // Автоматическая сварка. – 2005. – № 9. – С. 21-24.
3. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов. 4-е изд. / П.М. Тихомиров – М.: Энергия, 1976. – 544 с.

Машинобудування і зварювальне виробництво

4. Лейтес Л.В. Особенности проектирования мощных реакторов для кратковременной работы / Л.В. Лейтес – М.: Электричество, 1963. – № 10, С. 67-69.
5. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л.В. Лейтес – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
6. Пентегов И.В. Оптимизация математических моделей трансформаторов и реакторов / И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Электричество. –2006, № 3. – С.35-47.
7. Кубарев Л.П. Оптимизация и оценка параметров броневых и ярмовых реакторов [Текст] / Л.П. Кубарев. Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1976, вып.10. – С.1-4.
8. Кубарев Л.П. Оптимизация и оценка параметров реакторов с зазорами в стержне магнитопровода [Текст] / Л.П. Кубарев // Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 3 (23). - С. 9-12.

Popov S.M., Kapustian O.Ye.

ALGORITHM OF MULTIFACTOR NUMERICAL METHOD OF OPTIMIZATION OF MASS, DIMENSIONAL AND ELECTRICAL PARAMETERS OF WELDING TRANSFORMERS

The paper presents the concept of a multifactor system approach to optimizing the consumption rates of materials for electric welding reactors, taking into account numerical methods. It is shown that the total cost components are expressed in terms of the dimensions of welding transformers, reactors and electromagnetic loads (current density in the windings, induction in steel), which will further allow finding characteristics that provide a combination of optimal design parameters of electrical equipment and their possible nominal and peak loads. At the same time, the task of analytical optimization is quite complex and time-consuming, so earlier when solving it was not possible to take into account a number of important factors that are not related to a simple analytical dependence, which would determine the price estimate depending on manufacturability, reliability, short-circuit resistance, load capacity and other factors. The optimization criterion was chosen to minimize the costs of manufacturing and operating the reactor at given consumer properties (determined by the customer), taking into account the reactor power, insulation class, nature of nonlinearity, short-circuit resistance, load capacity, service life, etc. Calculations were carried out using the MathCAD mathematical package. It is shown that determining the optimal parameters of a three-phase yoke welding reactor by using semi-empirical coefficients leads to obtaining averaged values, which causes additional costs of active materials. A structural-analytical scheme for the design synthesis of electric reactors has been developed. The dependence of the masses and the corresponding electrical losses of these masses at the minimum of the objective function for a given inductive resistance of the reactor has been obtained.

Keywords: welding reactor, objective function, numerical optimization, magnetic circuit, winding.

Стаття надійшла 12.05.2025р.

Мітяєв О.А., Петрашов О.С., Капустян О.Є.

СПАДКОВЕ МОДИФІКУВАННЯ ВТОРИННИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Низька вартість алюмінієвих ливарних сплавів зумовлює високий інтерес до пошуків нових методів її переробки. Застосування загальновідомих методів управління структурою та властивостями виливків із алюмінієвих сплавів не завжди забезпечують необхідну якість деталей, виготовлених із вторинної сировини, у зв'язку з негативним впливом шихти та домішок заліза. Мета досліджень - підвищення механічних властивостей вторинних ливарних алюмінієвих сплавів та розробка нової ресурсозберігаючої технології їх рециклінгу. Матеріалом для даного дослідження обрано сплав АК7ч і його аналог А356.2. Частина шихти була перероблена в дрібнокристалічний переплав шляхом розливання рідкого металу температурою 720 °С в воду при температурі 20°С. Експериментальні плавки з різним складом вихідної шихти, різною обробкою комплексом, що модифікує і різною концентрацією заліза проводили в електричній печі опору. Дослідження структури і контроль механічних властивостей здійснювали на зразках після термічної обробки по режиму Т6. Проведені дослідження показали що комплексне застосування модифікуючої обробки і дрібнокристалічного переплаву (МК-1 до 0,1% і МКП до 45% у складі) здатне значно підвищити механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів АК7ч і А356.2 ($\sigma_b > 300$ МПа, $\delta > 5\%$ і $HRB > 50$). Отримано залежності межі міцності, відносного видовження і твердості від кількості модифікуючого комплексу і дрібнокристалічного переплаву в початковій шихті. Отримані результати дозволяють застосувати комплексну технологію переробки вторинної сировини для отримання якісних виливків в промислових умовах. Використання шихтових матеріалів зі сприятливою спадковою структурою дозволяє скоротити кількість застосовуваних добавок, що модифікують, що в свою чергу значно знижує викиди газів і покращує екологічну обстановку в ливарному цеху.

Ключові слова: алюміній; інтерметалідні фази; структура; спадковість; рециклінг; модифікуюча обробка.

Постановка проблеми. Алюмінієві ливарні сплави, завдяки їх фізичним і механічним властивостям, все частіше застосовуються в машинобудуванні замість чавуну і сталі. Низька вартість вторинної сировини зумовлює високий інтерес до пошуків нових методів її переробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що сплави на основі алюмінію мають спадковість, тобто структура і механічні властивості шихти певною мірою зберігаються у виливку [1,2]. Аналіз останніх досліджень показує, що якість литих алюмінієвих деталей здебільшого залежить від наступних факторів: технологічних параметрів лиття, наявності у сплаві сторонніх домішок (зокрема заліза) та розміру структурних складових шихти [3-5]. Розроблено безліч методів на розплав з метою підвищення механічних властивостей деталей, які зазвичай впливають однією з перелічених вище факторів [6]. Тому останнім часом дедалі ширше застосування знаходять технології комплексного на розплав [4,5].

Мета дослідження. Основним завданням даного дослідження була розробка ресурсозберігаючої технології переробки відходів власного виробництва зі сплавів АК7ч і А356.2, що включає обробку модифікуючим комплексом МК-1 [7] та заміну частини шихти спеціально підготовленим дрібнокристалічним переплавом.

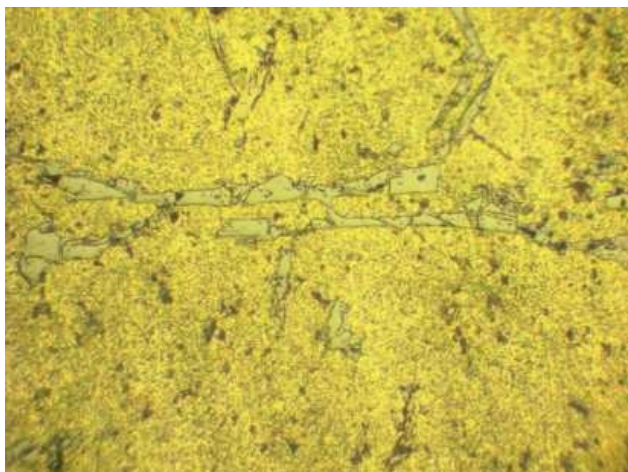
Основний матеріал дослідження. Як матеріал для цього дослідження застосовувався сплав, що складається з повернення доєвтектичних сплавів АК7ч та його закордонного

Машинобудування і зварювальне виробництво

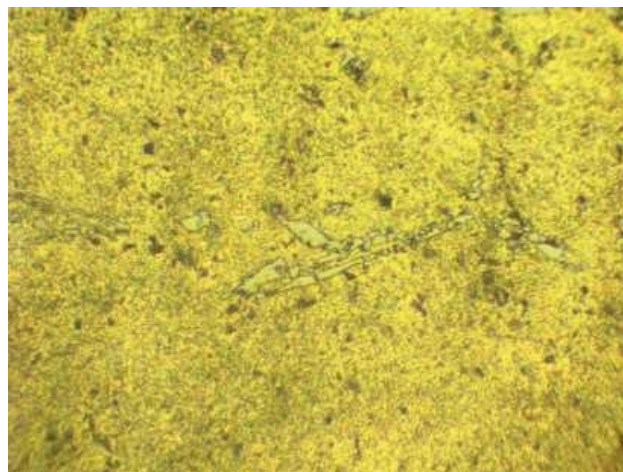
аналога А356.2 (табл. 1) у пропорціях по масі 1:1. Ця шихта мала грубу кристалічну структуру (рис. 1).

Таблиця 1 - Хімічний склад сплавів, що використовуються як шихта

Сплав	Вміст елементів, мас %						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
АК7ч	6,72	0,60	0,05	0,08	0,32	0,02	0,01
А356.2	7,07	0,11	0,02	0,02	0,23	0,03	0,07



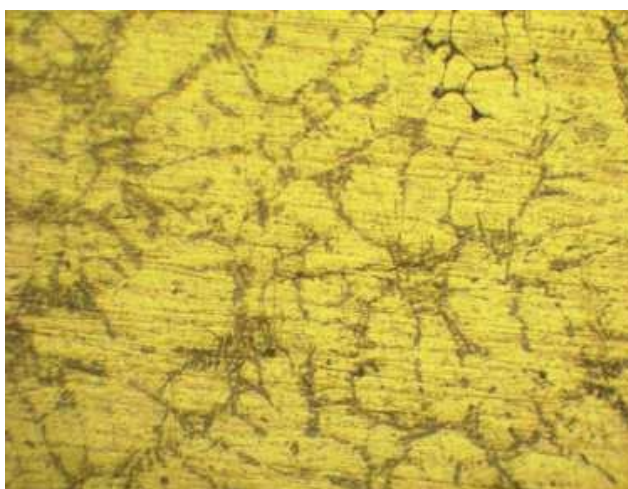
а



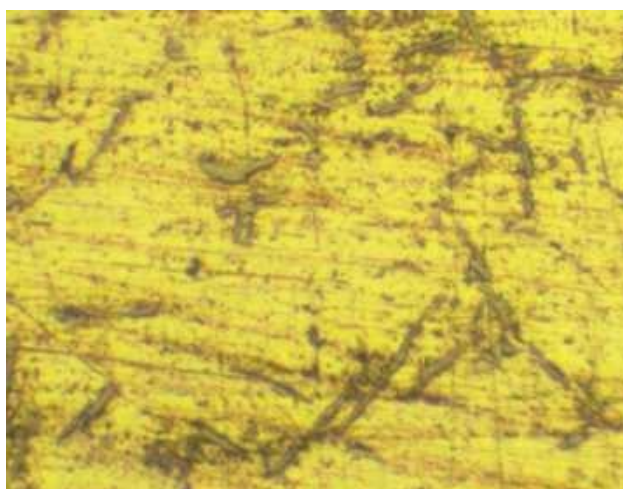
б

Рисунок 1 – Мікроструктура шихти x400: а – АК7ч; б – А356.2

Відповідно до складеного рототабельного плану повного факторного експерименту 2³ було проведено 20 дослідних плавок масою по 3 кг. Розплав готували в електричній печі опору. Частина шихти пройшла попередню переробку загартованим затвердінням шляхом розливання рідкого металу при температурі 720 °С через ємність з перфорованим дном у воду 20°С. У результаті було отримано дрібнокристалічний переплав (МКП), як гранул Ø 10...20 мм з ультрадисперсною структурою (рис. 2).



а



б

Рисунок 2 – Мікроструктура МКП: а – x400; б – x1000

Як змінні незалежні фактори було прийнято: вміст МКП у вихідній шихті від 0 до 84,1 %, вміст Fe від 0,16 до 1,84 % та кількість модифікуючого комплексу від 0,016 до 0,184 %. Вміст

Машинобудування і зварювальне виробництво

Fe у кожній плавці згідно з матрицею експерименту вирівнювався шляхом дошихтування розплаву при температурі 720 °C залізним порошком ПЖР2 [8]. Перед розливом у сталевий кокіль розплав піддавався обробці модифікуючим комплексом МК-1. Термообробку проводили за режимом Т6 згідно з ГОСТ 1583-93, після чого виготовляли шліфи для вивчення мікроструктури та зразки для механічних випробувань. Для вивчення мікроструктури використовувався оптичний мікроскоп SIGETA MM-700 зі збільшенням у 400 разів після обробки поверхні шліфу водним розчином кислот 0,5% HF+0,5% HNO₃+1,5% HCl протягом 10 с. Статистична обробка результатів проводилася з використанням методів статистичного аналізу та програми Microsoft Excel [9].

Сплави, оброблені за комплексною технологією мали структуру, що складається з алюмінієвої матриці (α -твердий розчин Si та інших домішок Al), евтектичного Si та інтерметалідних фаз Al₃FeSi, Al₃Fe, Al₂Fe [4] (рис. 3). Залежно від складу шихти, вмісту Fe та кількості застосовуваного модифікатора частинки кремнію та залізовмісних фаз змінювали свій розмір і форму, що стало основним фактором, що впливає на механічні властивості сплавів, що узгоджується з результатами робіт [3, 4, 10].

Представлені структури «зоряних» точок матриці планування експерименту відображають вплив факторів, що вивчаються, на структурні зміни і механічні властивості сплаву (рис 3, 4 і 5).

Підвищення вмісту МКП у шихті від 0 до 84,1% призвело до диспергування кремнію та інтерметалідних включень (рис. 3а, б). Збільшення концентрації Fe з 0,16 до 1,84% призводило до утворення у сплаві великої кількості витягнутих інтерметалідних фаз (див. рис. 3, г). Зростаюча присадка модифікатора МК-1 активно впливала на розмір та форму основних структурних складових.

Результати статистичної обробки дозволили отримати невідомі раніше залежності межі міцності, відносного подовження і твердості від досліджуваних чинників. Залежності мають точку екстремуму в межах області дослідження, що свідчить про раціональний вибір інтервалів варіювання факторів, що вивчаються.

Застосування шихти, що містить 30...45% МКП дозволяє підвищувати межу міцності σ_b на 30...40 МПа, відносне подовження δ на 1...2 % і твердість HRB на 2...6 од. (рис. 4). Подальше збільшення МКП у шихті призводить до зниження механічних властивостей, що ймовірно пов'язане із забрудненням сплаву оксидом алюмінію Al₂O₃.

Обробка модифікуючим комплексом МК-1 дозволяє досягти підвищення межі міцності на 15-30 МПа, відносного подовження на 1-1,3% і твердості на 7-8 од. (рис. 5). Підвищення механічних властивостей досягнуто в результаті подрібнення та зміни форми кристалів первинного кремнію та інтерметалідів (рис. 3 д, е). Зростання концентрації Fe у сплаві призвело до зниження пластичності та підвищення твердості (рис. 3, 4) на всьому інтервалі досліджень. У концентраціях до 1,0 % Fe залізо підвищувало межу міцності через зміцнення твердого розчину Al. Вищі концентрації Fe призводили до зниження σ_b внаслідок утворення витягнутих інтерметалідних фаз, що мають низький когерентний зв'язок з матрицею і виступають у ролі активного концентратора напружень, що узгоджується з отриманими раніше результатами [4, 10].

Наукова новизна та практична цінність. Вперше отримані залежності σ_b , δ , HRB від кількості МКП, Fe та модифікатора для вторинних сплавів АК7ч і АЗ56.2. Показано нові можливості підвищення механічних властивостей вторинних силумінів, внаслідок обробки розплаву модифікуючим комплексом МК-1 у поєднанні з використанням МКП. Отримані результати дозволили застосувати розроблену комплексну технологію для отримання якісних виливків із відходів виробництва у промислових умовах.

Машинобудування і зварювальне виробництво

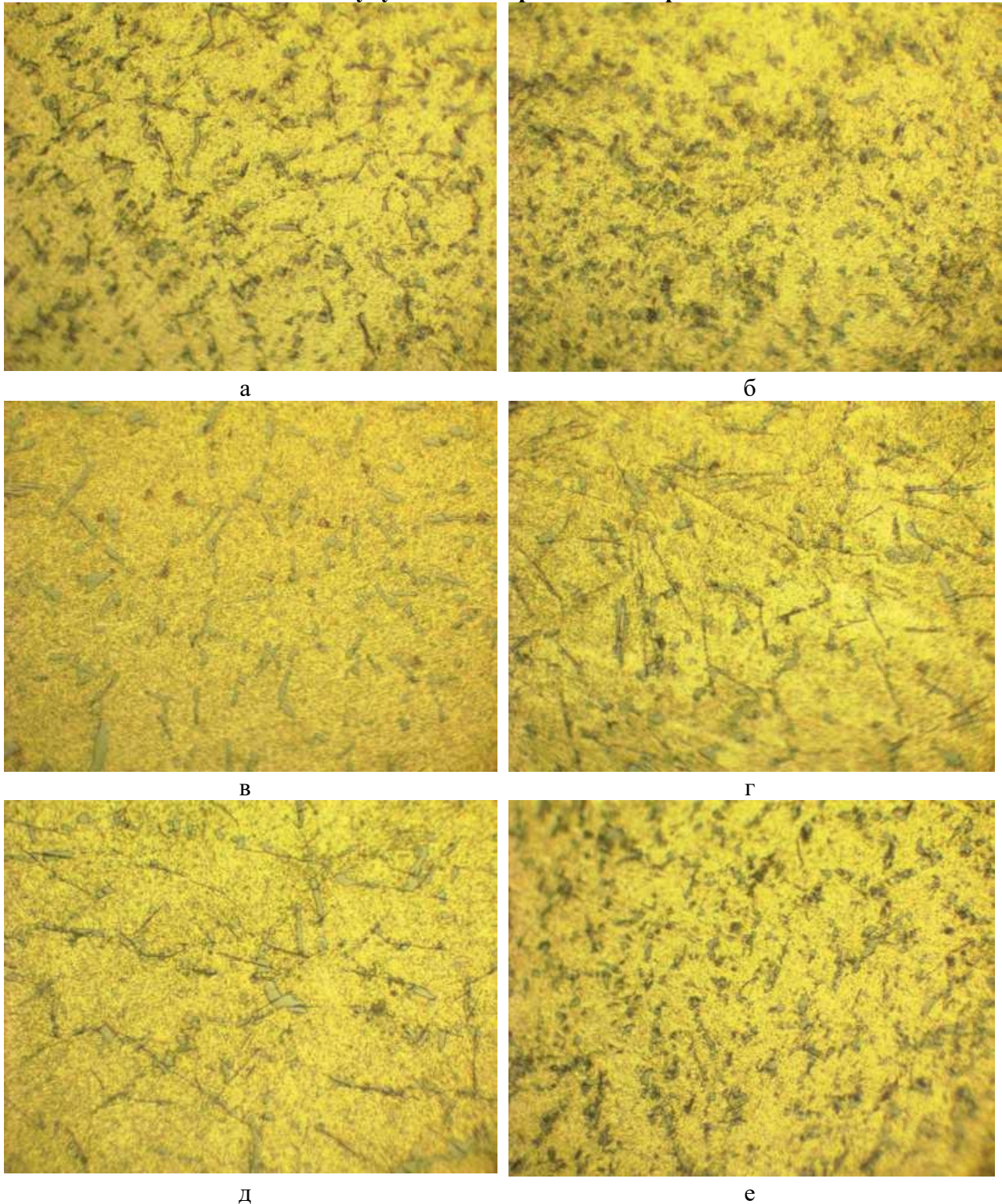


Рисунок 3 – Мікроструктура сплаву АК7ч х400: а – 0%МКП 1,0% Fe 0,1%МК-1; б – 84,1%МКП 1,0% Fe 0,1%МК-1; в – 42,05%МКП 0,16% Fe 0,1%МК-1 ; г – 42,05%МКП 1,84% Fe 0,1%МК-1; д – 42,05%МКП 1,0% Fe 0,016%МК-1 ; е – 42,05%МКП 1,0% Fe 0,184%МК -1

Машинобудування і зварювальне виробництво

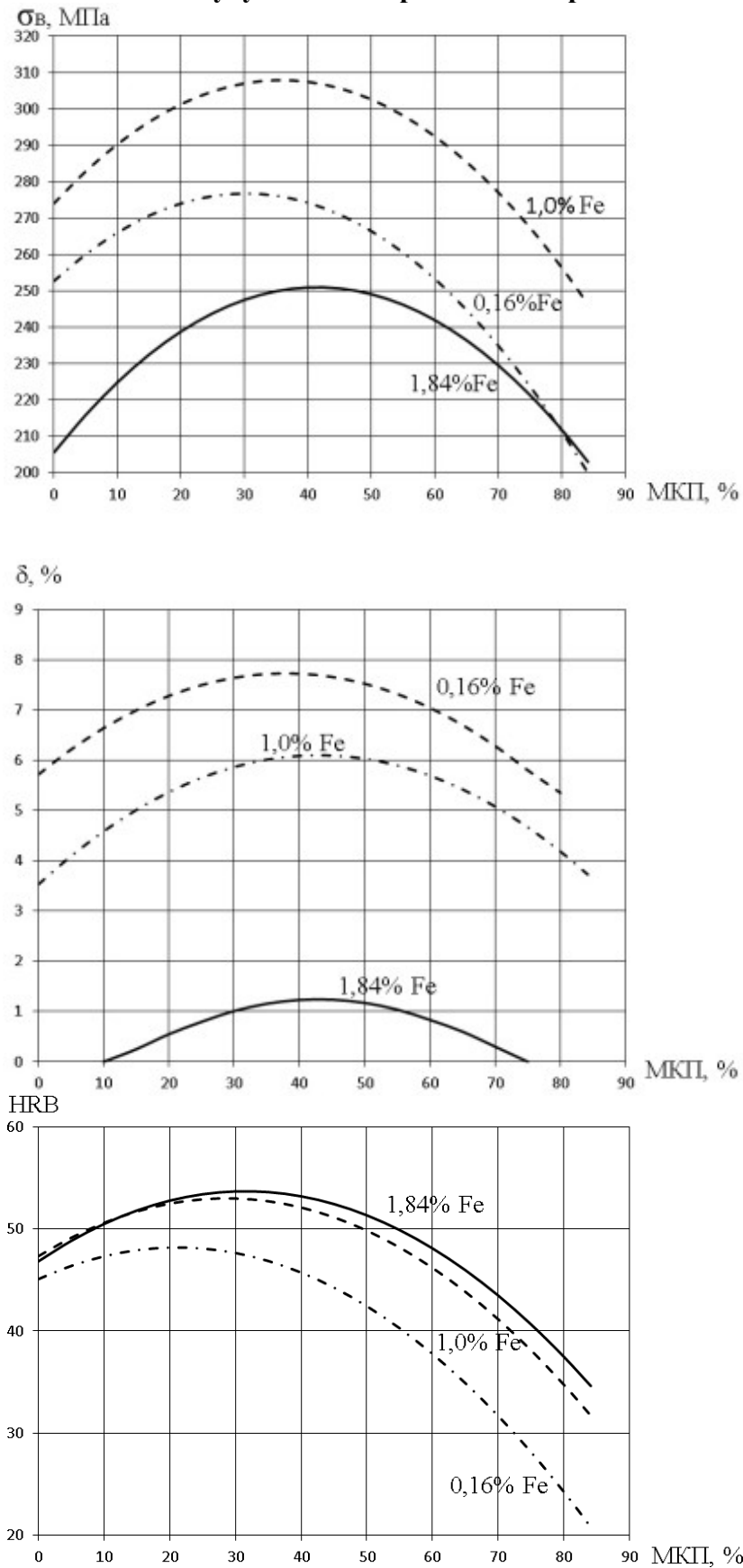


Рисунок 4 – Вплив складу шихти та концентрації Fe на механічні властивості сплаву АК7ч при обробці розплаву 0,1% МК-1

Машинобудування і зварювальне виробництво

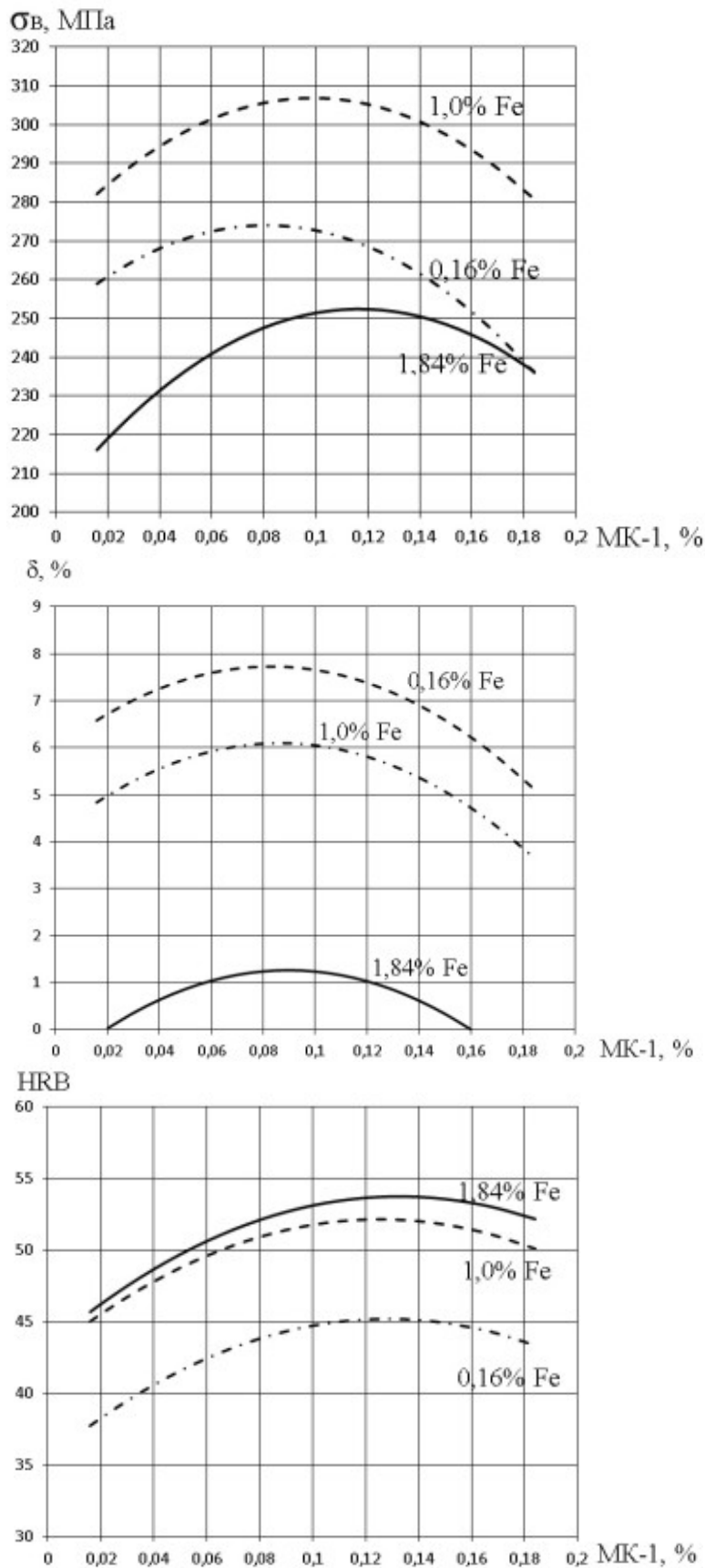


Рисунок 5 – Вплив кількості МК-1 та концентрації Fe на механічні властивості сплаву АК7ч за наявності в шихті МКПІ 42,05%

ВИСНОВКИ

1. Застосування загальновідомих методів управління структурою та властивостями виливків із алюмінієвих сплавів не завжди забезпечують необхідну якість деталей, виготовлених із вторинної сировини, у зв'язку з негативним впливом шихти та домішок заліза.
2. Встановлено, що отримання виливків з високими показниками механічних властивостей $\sigma_B > 300$ МПа, $\delta > 5\%$ і HRB > 50 для ливарних сплавів АК7ч і А356.2 можливе при застосуванні обробки МК-1 до 0,1% і МКП до 45% у складі.
3. Використання шихтових матеріалів зі сприятливою спадковою структурою дозволяє скоротити кількість застосовуваних добавок, що модифікують, що в свою чергу значно знижує викиди газів і покращує екологічну обстановку в ливарному цеху.

Список використаних джерел

1. *Марукович Е.И.* Модифицирование сплавов / *Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко.* – Минск : Беларуская навука, 2009. – 192с.
2. *Никитин В.И.* Развитие и применение явления структурной наследственности в алюминиевых сплавах / *В. И. Никитин, К. В. Никитин* // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.* – 2014. – № 4 – с. 424-429 – Режим доступа: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/13236>.
3. *Лютова О. В.* Повышение литейных свойств вторичных алюминиевых сплавов / *О. В. Лютова* // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.* - 2013. - № 3. - С. 53–59. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2013_3_9.
4. *Доценко Ю. В.* Влияние комплексной технологии на свойства отливок из сплава АК7ч с повышенным содержанием железа / *Ю.В. Доценко, В.Ю. Селиверстов* // *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* – 2011. – Вип. № 54. – с.45–48. – Режим доступа: journals.uran.ua/eejet/article/download/2282/2086.
5. *Немененок Б.М.* Теория и практика комплексного модифицирования силуминов. – Мн.: Технопринт, 1999. – 1072с.
6. *Марукович Е.И.* Повышение эффективности модифицирования / *Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко* // *Литье и металлургия.* 2006. №2. С. 151-152.
7. Пат. 46094 Україна, МПК (2009) C22C1/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / *Лоза К. М., Мітяєв О. А., Волчок І. П.* (Україна); заявник та патентовласник Запорізький національний технічний університет. – № u200905914; заявл. 09.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 4 с.
8. ГОСТ 9849-86 Порошок железный. Технические условия. – Введ. 1987-06-30. – М.: Изд-во стандартов, 1987. — 9 с. Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/19/19859.shtml>.
9. *Борздова Т.В.* Основы статистического анализа и обработка данных с применением Microsoft Excel. – Минск : ГИУСТ БГУ, 2011. – 75с.
10. *Волчок И. П.* Повышение механических свойств вторичных сплавов АК7ч и А356.2 / *И. П. Волчок, А. А. Митяев, Р. А. Фролов, К. Н. Лоза, В. В. Клочихин, В. В. Лукинов* // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Стародубовские чтения.* - 2016. - Вып. 90. - С. 64–70. - Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmssc_2016_90_10.

Mityayev O. A., Petrashev O.S., Kapustian O.Ye.

HEREDITARY MODIFICATION OF SECONDARY ALUMINUM ALLOYS

The low cost of aluminum casting alloys causes high interest in the search for new methods of processing. The use of well-known methods of controlling the structure and properties of aluminum alloy castings does not always provide the required quality of parts made from secondary raw materials due to the negative impact of the charge and iron impurities. The purpose of the research is to improve the mechanical properties of secondary aluminum casting alloys and develop a new resource-saving technology for their recycling. The material for this study was the AK7ch alloy and its analogue A356.2. Part of the charge was processed into a fine-crystalline remelt by pouring liquid metal with a temperature of 720 °C into water at a temperature of 20 °C. Experimental melting with different composition of the initial charge, different treatment with a modifying complex and different iron concentration was carried out in an electric resistance furnace. The study of the structure and control of mechanical properties was carried out on samples after heat treatment in the T6 mode. The conducted studies have shown that the complex application of modifying treatment and fine-crystalline remelting (MK-1 up to 0.1% and MKP up to 45% in the composition) can significantly increase the mechanical properties of secondary aluminum alloys AK7ch and A356.2 ($\sigma_v > 300$ MPa, $\delta > 5\%$ and HRB > 50). The dependences of the tensile strength, relative elongation and hardness on the amount of modifying complex and fine-crystalline remelting in the initial charge were obtained. The obtained results allow the application of complex technology for processing secondary raw materials to obtain high-quality castings in industrial conditions. The use of charge materials with a favorable hereditary structure allows reducing the amount of modifying additives used, which in turn significantly reduces gas emissions and improves the environmental situation in the foundry.

Keywords: aluminum; intermetallic phases; structure; heredity; recycling; modifying treatment.

Стаття надійшла 12.05.2025р.

УДК 669.14.018.24

doi.org/10.31498/2522-9990292025330226

Сидоренко М.В., Фролов Р.О., Єманов М.В., Капустян О.Є.

ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ КОНТАКТНОЇ ВИТРИВАЛОСТІ СТАЛІ ЕІ-347Ш

Вальницькі машин нового покоління стають все більш складними виробами, до яких пред'являються високі вимоги щодо забезпечення контактної витривалості, у тому числі при підвищеній температурі. Для підвищення контактної витривалості застосовують поверхневе пластичне деформування (ППД). Одним з перспективних напрямків ППД є зміцнення мікрокульками. Більшість робіт не враховує вплив температури на контактну витривалість деталей після ППД. Метою роботи є підвищення контактної витривалості сталі ЕІ-347Ш за рахунок раціоналізації режимів зміцнення мікрокульками та скляними кульками. Випробування на контактну втому проводилися на установках МКВ-Т при температурах 20 °C і 300 °C. Всі зразки перед зміцненням піддавалися поліруванню. Для цього було спеціально розроблено пристосування, яке забезпечувало постійний тиск на зразок при

Машинобудування і зварювальне виробництво

поліруванні. Визначення залишкових напружень проводили методом свердління глухого отвору на зразках свідках. Для визначення впливу тиску робочої рідини на контактну витривалість були проведені випробування чотирьох партій зразків: в початковому стані і зміцнених на протязі 3-х хвилин при тиску робочої рідини 0,16; 0,2; 0,25 МПа відповідно. Розглянуті режими зміцнення призводять до збільшення шорсткості в порівнянні з поліруванням приблизно на один квалітет. Найменша зміна шорсткості спостерігається при тиску робочої рідини 0,2 МПа. Глибина зміцненого шару на всіх режимах знаходиться в межах 0,08 ... 0,1 мм. При тиску робочої рідини 0,16 МПа спостерігалось зниження мікротвердості, яке пов'язане з нестійкістю процесу і нерівномірністю зміцнення. Визначені середнелогарифмічна довговічність та гарантована довговічність; побудовані прямі, що апроксимують функції розподілу логарифмів кількості циклів. Встановлено, що найбільша довговічність зразків має місце при зміцненні скляними кульками при тиску робочої рідини 0,3 МПа, що обумовлено сприятливим поєднанням величини залишкових напружень, наклепу, мікротвердості, які отримані при мінімальному збільшенні шорсткості. Встановлено закономірності впливу режимів зміцнення мікрокульками та скляними кульками на контактну витривалість сталі EI-347Ш. Застосовані більш сучасні методики випробувань. Визначено параметри зміцнення зразків зі сталі EI-347Ш мікрокульками та скляними кульками, які забезпечують підвищення довговічності при контактному навантаженні. Це дозволить раціонально призначати режими ППД при проектуванні вальниць для перспективних газотурбінних двигунів. Удосконалено методику випробувань, що дозволило підвищити достовірність отриманих результатів.

Ключові слова: вальниці, контактна витривалість, залишкові напруження, довговічність, зміцнення мікрокульками, скляні кульки.

Постановка проблеми. Вальниці машин нового покоління стають більш складними виробами, до яких висувають високі вимоги щодо забезпечення контактної витривалості, зокрема при роботі в умовах підвищеної температури. Сучасні тенденції спрямовані на створення вальниць інтегрованих у конструкцію двигуна, гібридних опор, освоєння нових теплостійких сталей, удосконалення технології фінішної обробки [1-4]. Однак розроблені методи фінішної обробки не завжди дають змогу досягти бажаної ефективності та продуктивності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для підвищення контактної витривалості деталей вальниць часто застосовується поверхневе пластичне деформування (ППД) [5], [10], [12], [13]. Для тонкостінних вальницевих кілець, хороші результати забезпечує ультразвукове зміцнення [9]. Одним із перспективних напрямків ППД є зміцнення мікрокульками [2], [7], [8]. Водночас більшість робіт з контактної витривалості вальницевих сталей не враховує вплив температури на довговічність деталей після ППД [6], [11], [13].

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення контактної витривалості сталі EI-347Ш за рахунок вибору раціональних параметрів гідродробоструменевого зміцнення мікрокульками.

Основний матеріал дослідження. Випробуванням піддавалися зразки зі сталі EI-347Ш (8X4B9Ф2-Ш) виготовлені за ТУ 14-1-2244-2005, хімічний склад якої наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі EI-347Ш

Вміст елементів, %								
Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	V
основа	0,78	0,26	0,27	4,57	0,15	8,64	0,25	1,55

Машинобудування і зварювальне виробництво

Термообробку зразків проводили за стандартною технологією для сталей цього класу: загартування з охолодженням в мастило при 20 °С і триразове відпускання при температурі 560 °С. Для досліджень відібрано зразки з твердістю після термообробки HRC 63...64. Твердість контролювали за допомогою ТК-2. Усі зразки перед зміцненням піддавалися поліруванню. Для цього було спеціально розроблено пристосування, яке забезпечувало постійний тиск на зразок під час полірування. Поверхнєве пластичне деформування здійснювалося способом гідродробоструменевого зміцнення сталевими і скляними мікрокульками діаметром 50...150 мкм. Час гідроструменевої обробки варіювався від 1,5...9 хв.

У зв'язку з необхідністю проведення випробувань за температури 300 °С змащування зразків проводили синтетичним мастилом ВТ-301 (ТУ 38.101657-85).

Випробування на контактну втому проводили на установках МКВ-Т за температур 20 °С і 300 °С. Схема випробування полягає в обкатці випробуваного зразка між двома циліндричними випробувальними дисками. Така схема випробувань для вальницьових сталей застосовується Pratt & Whitney [5].

Застаріла система керування дослідних стендів МКВ-Т, що містила в собі ламповий підсилювач сигналу з досить низькою чутливістю, була замінена на новий електронний блок керування, побудований на основі сучасного мікроконтролера Atmega 2560.

Застосування мікроконтролера дозволило нам значно зменшити розміри блоку керування, при цьому спростити використання існуючих функцій та додати нові, а саме:

- автоматизувати механізми навантаження та розвантаження за допомогою крокового двигуна;
- вести журнал (файл), в якому фіксуються події та результати дослідження (інформація отримана від датчиків) в хронологічній послідовності;
- забезпечити плавний пуск електродвигуна, через частотний перетворювач, який керується тим самим мікроконтролером;
- більш точний контроль температури зразка за допомогою хромель-алюмелевої термопари.

Мікроконтролер може вимкнути машину при руйнуванні зразка та дозволяє проводити дослідження за змінною циклограмою навантаження, або змінною частотою обертання зразка.

Режим випробувань: максимальні контактні напруги - 4000 МПа, частота обертання зразка - 29000 хв⁻¹. Для запобігання можливого проковзування було встановлено систему контролю частоти обертання ведучого і веденого натискних дисків лазерними тахометрами.

Визначення залишкових напружень проводили методом свердління глухого отвору [6] на зразках свідках на базі системи MTS3000-Restan [10]. Висока частота обертання алмазного свердла (300000 хв⁻¹) дає змогу знехтувати впливом свердління на величину залишкових напружень. Беручи до уваги твердість матеріалу, були використані зворотно конусні алмазні свердла. Відсутність значної зміни геометрії інструменту проконтрольовану під мікроскопом після проведення вимірювань підтвердив правильність вибору інструменту.

Для визначення впливу тиску робочої рідини на контактну витривалість було проведено випробування партій по 15 зразків: у вихідному стані та зміцнених протягом 3-х хвилин за тиску робочої рідини 0,16; 0,2; 0,25 МПа при температурі 20 °С та 300 °С відповідно.

Розглянуті режими зміцнення призводять до збільшення шорсткості порівняно з поліруванням приблизно на один квалітет. Найменша зміна шорсткості спостерігається за тиску робочої рідини 0,2 МПа.

Глибину наклепу визначали за розподілом мікротвердості поперечного перерізу зразка. Глибина зміцненого шару за всіх режимів обробки перебуває в межах 0,08...0,1 мм. За тиску робочої рідини 0,16 МПа спостерігалось зниження мікротвердості, що пов'язано з нестабільністю процесу і нерівномірністю зміцнення.

Розподіл залишкових напружень за глибиною зразка показує переваги режимів

Машинобудування і зварювальне виробництво

зміцнення при тиску робочої рідини 0,2 і 0,25 МПа (рис. 1). Характер розподілу відповідає даним, отриманим для ППД мікрокульками [1], [8].

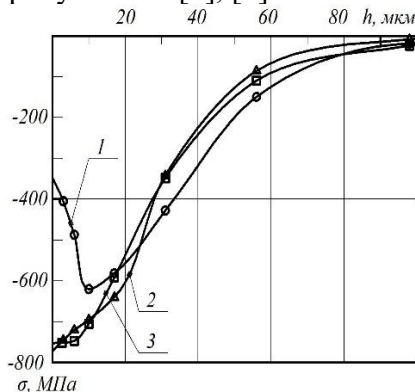


Рисунок 1 – Розподіл залишкових напружень після обробки мікрокульками:
1 – $p=0,16$ МПа; 2 – $p=0,2$ МПа; 3 – $p=0,25$ МПа

Огляд і контроль зразків до і після випробувань свідчив, що знос їхніх робочих поверхонь внаслідок стирання був практично відсутній. Основною причиною виходу з ладу зразків як при температурі 20°C, так і температурі 300°C була класична контактна втома поверхневих шарів, що супроводжується появою піттингу.

У результаті статистичного опрацювання було визначено: середньологарифмічну довговічність N_{50} , що відповідає 50% ймовірності руйнування; гарантовану довговічність N_{10} , що відповідає 10% ймовірності руйнування зразків, а також середньоквадратичне відхилення. За обчисленими значеннями побудовано прямі апроксимації функції розподілу логарифмів чисел циклів (рис. 2, 3).

Встановлено, значне збільшення довговічності досліджуваних зразків спостерігається при збільшенні часу обробки з 1,5 до 3 хвилин, що пояснюється збільшенням залишкових напружень стиснення на поверхні зразка та зменшенням шорсткості поверхні. При подальшому збільшенні часу 6 хвилин, збільшення довговічності не суттєве, а при збільшенні часу обробки до 9 хвилин довговічність зразків взагалі зменшилася у зв'язку з зниженням шорсткості поверхні внаслідок інтенсивного надклепування.

За результатами досліджень встановлено, що найбільша довговічність зразків досягається при зміцненні за допомогою тиску робочої рідини 0,2 МПа, що зумовлено сприятливим поєднанням величини залишкових напружень, наклепу та мікротвердості, які отримано за мінімального збільшення шорсткості.

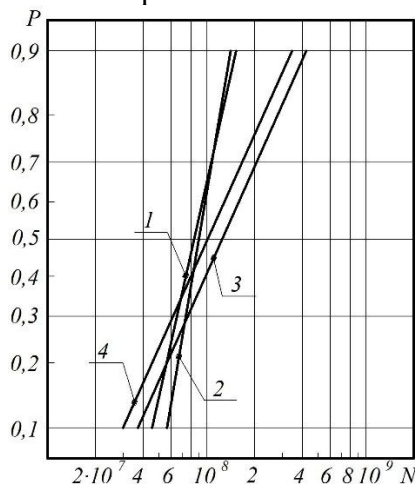


Рисунок 2 – Графіки функцій розподілу довговічності зразків за температури 20 °C:
1 – початковий стан; 2 – $p=0,16$ МПа; 3 – $p=0,2$ МПа; 4 – $p=0,25$ МПа

Машинобудування і зварювальне виробництво

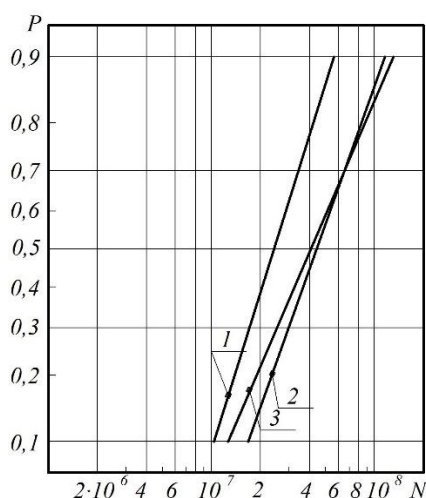


Рисунок 3 – Графіки функцій розподілу довговічності зразків за температури 300°C:
1 – початковий стан; 2 – $p=0,2$ МПа; 3 – $p=0,25$ МПа

Зниження довговічності зразків, за результатами контактних випробувань при підвищеній температурі до 300 °C, на нашу думку пов'язане із проявом поверхнево-активних властивостей мастила ВТ-301. Відбувається збільшення здатності мастила проникати у мікропошкодження поверхні зразка, кількість яких збільшується із збільшенням часу обробки. Це припущення додатково підтверджується характерним виглядом втомного руйнування зразків випробуваних при температурі 300 °C – майже одночасного утворення на доріжці контакту кількох втомних піттингів.

Вплив тиску робочої рідини на контактну витривалість сталі при зміцненні скляними шариками проводили для трьох партій зразків що було зміцнені за наступними режимами: $p=0,18$ МПа; $p=0,25$ МПа; $p=0,3$ МПа; при температурі 20 °C та 300 °C. Обробка зразків проходила відповідно аналогічним попереднім партіям. Контроль жорсткості поверхні зразків проведений після їх зміцнення при різних тисках робочої рідини показав, що найменшу шорсткість мають зразки при $p=0,3$ МПа; а найбільшу при $p=0,18$ МПа - це є слідством недостатньо стабільної роботи соплового апарату установки в процесі зміцнення при невисоких тисках робочої рідини. Аналізуючи результати випробувань (рис. 2-5) можна зробити висновок, що режим зміцнення сталі скляними кульками про тиску робочої рідини $p=0,3$ МПа є найбільш раціональною з точки зору підвищення контактної витривалості.

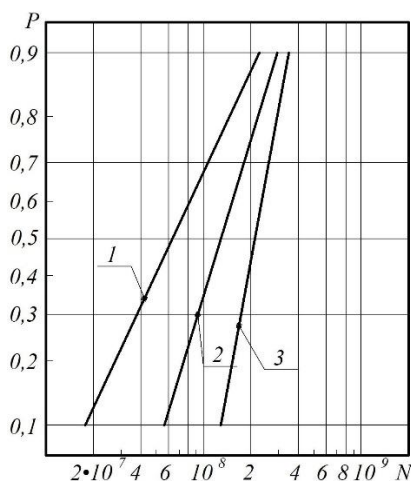


Рисунок 4 – Графіки функцій розподілу довговічності зразків оброблених скляними кульками за температури 20°C: 1 – $p=0,18$ МПа; 2 – $p=0,25$ МПа; 3 – $p=0,3$ МПа

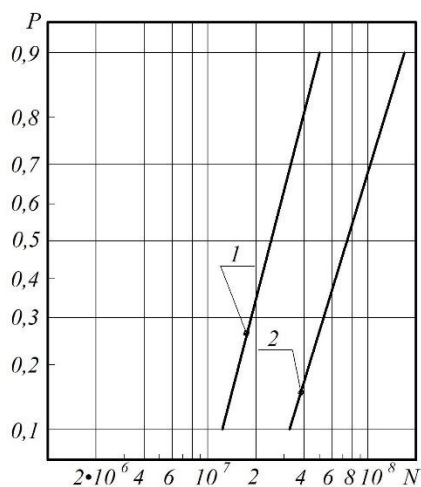


Рисунок 5 – Графіки функцій розподілу довговічності зразків оброблених скляними кульками за температури 300°C: 1 – $p = 0,18$ МПа; 2 – $p = 0,3$ МПа

Встановлено закономірності впливу режимів зміцнення мікрокульками та скляними кульками на контактну витривалість сталі EI-347Ш. Застосовано більш сучасні методики випробувань.

Визначено раціональні параметри зміцнення зразків зі сталі EI-347Ш мікрокульками та скляними кульками, які забезпечують підвищення довговічності при контактному навантаженні. Це дасть змогу підвищити надійність вальниць для широкої номенклатури машин спеціального машинобудування. Удосконалено методику та оновлено матеріально-технічну базу лабораторії контактної міцності, що дало змогу підвищити достовірність отриманих результатів.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що зміцнення мікрокульками та скляними кульками є перспективним напрямком ППД для деталей вальниць зі сталі EI-347Ш, яке забезпечує підвищення контактної довговічності як при 20 °C, так і при 300 °C та дозволяє підвищити контактну витривалість у 1,5...2 рази.

2. Визначено параметри зміцнення зразків зі сталі EI-347Ш мікрокульками, та скляними кульками, що забезпечують підвищення довговічності при контактному навантаженні. Встановлено, що найбільша довговічність зразків досягається при зміцненні скляними кульками при тиску робочої рідини 0,3 МПа.

3. Отримано закономірності розподілу залишкових напружень за глибиною зразків зі сталі EI-347Ш за різних режимів зміцнення мікрокульками та скляними кульками.

У подальших роботах необхідно дослідити вплив на контактну витривалість інших методів зміцнення поверхневого шару деталей, що працюють в умовах високих контактних напружень.

Список використаних джерел

1. Cretu S., Benchea M., Cretu O. Compressive Residual Stresses Effect on Fatigue Life of Rolling Bearings. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. 2007. Vol. 3. P. 1–6. DOI: 10.1115/IMECE2007-43561.
2. Zhang X., Wu D., Xia Z., Li Y., Wang J., Han E. Comparative Study on Surface Contact

Машинобудування і зварювальне виробництво

Fatigue of Machine Tool Bearing Raceways with Different Rolling Elements: Two Failure Bearings Case Studies. *Tribology Letters*. 2023. Vol. 71. P. 1-6. DOI: 10.1007/s11249-023-01722-7.

3. Cretu S., Benchea M. Residual stresses effect on fatigue life of rolling contacts. *10th International Conference on Tribology – November 8-10, 2007*. P. 106–110.

4. Aftanaziv I., Strohan O., Svidrak I., Royko Y., Berezovetska O., Bielikov D., Kernytsky N., Chalecki M. Increasing the durability of large-calibre cannon barrels through strengthening them by surface plastic deformation. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*. 2024. Vol 23. P.351–357. DOI: 10.22630/ASPA.2024.23.27.

5. Guo J., Zhao A., Yang M. Mechanism of Microstructural Alterations of M50 Bearing Steel during Rolling Contact Fatigue under High Loads. *Metals*. 2023. Vol. 13(4). P. 1–15. DOI: 769.10.3390/met13040769.

6. ASTM E837-08. Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain-Gage Method. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008. – 16 p.

7. Harada Y., Tanaka S. G0400401 Effect of hard microshot peening on fatigue strength of spring steel. *The Proceedings of Mechanical Engineering Congress, Japan*. 2015. P. 1–8.

8. Harada Y., Yoshida K. Effect of Microshot Peening on Surface Characteristics of Spring Steel. *Materials Science Forum*. 2010. Vols. 654-656. P. 374-377. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.374.

9. Karar G., Kumar R., Chattopadhyaya S. A recent development on the material surface using shot peening and friction surfacing for industrial applications. *AIP Conference Proceedings*. 17 November. 2022. P.1–8. DOI: 2681.020027. 10.1063/5.0115763.

10. MTS3000 – Restan. Automatic System for Residual Stress Measurement by Hole-Drilling. - SINT Technology s.r.l., 2014. – 8 p.

11. Rubio H., Bustos A., Castejón C., Garcia-Prada, J.C. Evolution of Rolling Bearing Technology. *Advances in Mechanism and Machine Science*. 2023. P.991–1002. DOI: 10.1007/978-3-031-45709-8_97.

12. Yu B., Chunling X., Gao K., Yang W., Xin W., Sun Z., Zhang B., Tang Z. (2024). Effect of Compound Surface Modification of Shot Peening and DLC Coating on Surface Integrity and Fatigue Properties of Gear Steel 16Cr3NiWMoVNbE. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. №18. P.1–13. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e37991.

13. Beswick J. Bearing Steel Technologies: 10th Volume, Advances in Steel Technologies for Rolling Bearings. 2015. –620 p.

Sidorenko M. V., Frolov R. O., Yemanov N. F., Kapustian O.Ye.

ADVANCED METHODS FOR IMPROVING CONTACT RESISTANCE FOR STEEL EI-347SH

The new generation bearings of machines are becoming increasingly complex products, which meet high requirements for the contact fatigue, including one at elevated temperature. The surface plastic deformation (SPD) is used to increase the contact fatigue. One promising direction of SPD is micro-ball strengthening. The majority of works does not take into account the influence of temperature onto the contact fatigue of parts after SPD. The aim of the study is to increase the contact endurance of steel EI-347SH through the rationalization of modes of micro-ball and glass bead strengthening. Contact fatigue tests were carried out with the setup MKV-T at temperatures of 20 °C and 300 °C. All the samples were polished before strengthening. For this purpose a special device, which ensures a constant pressure on the sample during polishing was designed. The determination of residual stresses was performed on surveillance samples by the blind hole drilling method. To determine the influence of fluid pressure on the contact endurance a group of tests was carried out

Машинобудування і зварювальне виробництво

on four batches of samples: the samples in the original state, the samples strengthened within 3 minutes at the working fluid pressure of 0.16 MPa and the same but with pressure of 0.2; 0.25 MPa respectively. Selected strengthening modes lead to an increasing of surface roughness for about one quality class if to compare to after-polishing state. The lowest change in surface roughness was observed with the working fluid pressure of 0.2 MPa. For all modes, the depth of the strengthened layer is in the range of 0.08 ... 0.1 mm. The decrease in microhardness, which is related to instability and unevenness of the strengthening process, was observed at the working fluid pressure of 0.16 MPa. The mean log durability and the guaranteed durability was determined; straight lines approximating the distribution functions of logarithms of numbers of cycles were built. It was found that the highest durability of the glass bead blasting samples was obtained by strengthening mode with the working fluid pressure of 0.3 MPa that is caused by a favorable combination of levels of residual stresses, strain hardening, microhardness, in conjunction with a minimal increase in the surface roughness. Regularities of influence of the micro-balls and glass bead strengthening modes on the steel EI-347SH contact endurance were defined. More advanced testing methods were applied. The parameters of micro-ball and glass bead strengthening that provide increased durability under contact loading for steel EI-347SH samples were determined. This enables one to assign the modes of SPD when designing the bearings for promising type of gas turbine engines more efficiently. The test procedure has been improved, resulting in improved reliability of the experimental results.

Keywords: bearings, contact fatigue, residual stresses, durability, micro-ball strengthening, glass bead.

Стаття надійшла 16.05.2025р.

Каргін С.Б., Тарасюк Л.І., Бакланський В.М.

ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗЛИВАННЯ ТРУБНИХ МАРОК СТАЛЕЙ

Сучасне виробництво сталі в металургії диктується безперервним посиленням вимог до якості металу. Поряд зі зниженням рівня вмісту шкідливих домішок (сірка, фосфор, газ, кольорові метали) все більша увага приділяється ступеню чистоти сталі по неметалевим включенням (НВ), яка впливає на анізотропію властивостей, поріг холодноламкості, зварюваність, схильність до старіння та тощо.

Конвертерне виробництво має найбільший потенціал в сталеплавильному секторі завдяки надійності і високій економічності. Розвиток технологій виробництва нафтогазопровідних труб є однією з найбільш перспективних і затребуваних галузей в сучасній металургії. Аналіз економічної обстановки провідними фахівцями і вченими показав, що ціна на нафту і газ буде неухильно зростати з кожним роком. Це пов'язано з постійним виснаженням наявних родовищ і високими ресурс та енерговитратами для розробки нових родовищ.

Тому споруда надійних нафтогазових магістралей буде першочерговим завданням металургійних підприємств, які зуміли освоїти сучасні технології виплавки труб 4-го і 5-го покоління, які завжди будуть конкурентно спроможними на ринку.

У роботі проведено огляд світових тенденцій виробництва високоміцних нафтогазопровідних труб великого діаметру в країнах Європи, Японії та Україні. Зроблені висновки про перспективу розвитку технологій в цій галузі для нашої країни.

Користуючись світовими тенденціями, виконано аналіз можливостей виробництва сталі для нафтогазопровідних труб четвертого і п'ятого покоління на маріупольському комбінаті «Ім. Ілліча» (ММКІ), а також аналіз проблем, які можуть виникнути при виплавці цих сталей.

Ключові слова: киснево-конвертерне виробництво, сталь, технологічний цикл, сортамент продукції, машина безперервного лиття заготовок, кристалізатор, неметалічні включення, сляб, якість.

Постановка проблеми. Шлакові включення, що зустрічаються на поверхні безперервно-ливої заготовки та проникаючи всередину металу, є багатофазними, переважно силікатного характеру. У сортових заготовках великі шлакові включення частіше зустрічаються в районі ребр слябу.

Шлакові включення на поверхні безперервно литих заготовок з'являються внаслідок розмиву вогнетривів ківшів, затикування шлаку з проміжного ківшу і з дзеркала кристалізатора, спливання в кристалізаторі продуктів розкислення сталі, коливань рівня металу і тому подібне.

Значна кількість шлакових включень на меніску металу в кристалізаторі може привести до масових проривів твердої оболонки заготовки в зоні вторинного охолодження під кристалізатором.

Основні заходи, що дозволяють знизити забрудненість безперервно литого злитка шлаковими включеннями полягають в наступному: дотримання заданих режимів розкислення сталі; дотримання температурних режимів; застосування ерозійно стійких вогнетривких

Металургія

матеріалів; підтримання постійного рівня металу в проміжному ківші і кристалізаторі; правильний підбір шлаку утворюючих сумішей і рівномірна подача їх в кристалізатор.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Характерним дефектом злитку є поверхневі бульбашки у вигляді одиничних або групових пір, порожнин округлої або витягнутої форми. Вони можуть бути результатом газовиділення при затвердінні злитка, при згорянні мастила в кристалізаторі, при використанні вогнетривів і шлаку утворюючих сумішей з підвищеною вологістю і тому подібне.

Для зниження дефектів безперервно литої заготовки, пов'язаних з неметалевими включеннями, використається проміжний ківш машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Проміжний ківш, спочатку служив розподільним пристроєм, у міру розвитку безперервного розливання перетворився в рафінувальний агрегат.

Проміжні ківші сучасних МБЛЗ забезпечені пристроями, що дозволяють усунути вплив таких джерел забруднення, як вторинне окислювання, ерозія вогнетривів, потрапляння частинок покривного шлаку в потік розплаву і при цьому забезпечити спливання і поглинання неметалічних включень шлаком за рахунок правильної організації руху металу, що виключає появу застійних зон і укорочених шляхів, забезпечити використання додаткових технологічних прийомів - продувки інертними газами, застосування спеціальних кришок і покривних шлаків зі спеціальних флюсів, регулювання температури, проведення розкислення і легування сталі. Для цього необхідно реалізувати наступні заходи [1 - 8]:

- сталь заливають в проміжний ківш через подовжений занурюваний стакан з піддувом інертного газу;
- забезпечення необхідного часу для спливання включень за рахунок збільшення ємності проміжного ківшу;
- вдосконалення геометрії внутрішньої порожнини проміжного ківшу з метою створення оптимальної гідродинаміки потоку рідкої сталі;
- обладнання проміжного ківшу вогнетривкими перегородками для поліпшення в ньому гідродинаміці потоків рідкої сталі;
- з метою гасіння вихрової воронки, що утворюється при вході металу в розливний отвір, використовувати проміжний ківш з вставками вихрегасителями;
- застосування спеціальної вогнетривкої вставки, так званого «турбостопу», що дозволяє істотно гасити енергію падаючої струменя і більш рівномірно розподіляти потоки;
- забезпечення спливання включень шляхом використання зовнішнього джерела підігріву рідкої сталі в проміжному ківші;
- продувка рідкої сталі в проміжному ківші аргоном;
- вакуумування у проміжному ківші МБЛЗ;
- електромагнітне перемішування розплаву в проміжному ківші;
- герметизація проміжного ківшу;
- застосування для футерування робочого шару ківшу високо основних вогнетривких мас;
- регулярне оновлення покривного шлаку в міру насичення його неметалевими включеннями при асиміляції.

Вплив неметалевих включень на механічні властивості сталі визначаються не тільки їхнім хімічним складом і кількістю, але і фізичними властивостями, розмірами, формою і розподілом, а управління цими параметрами істотно впливає на службові властивості сталі для труб високого діаметру.

Найбільш ефективним засобом управління формою включень є модифікуючі обробки сталі кальцієм, яка веде до глобуляризації і подрібнення сульфідних включень, зміни їх хімічного складу і властивостей. Проведеними металографічними дослідженнями

встановлено, що присадка Са модифікує НВ. Включення, що мають глобулярну форму, є алюмінати, оточені шаром з високим вмістом Са і S [9-13].

Мета дослідження. На світовому ринку металу найбільш затребувана продукція труб великого діаметру четвертого і п'ятого покоління. Ці труби використовуються для створення нафтогазових магістралей на об'єктах нафтового виробництва, які працюють в жорстких умовах, в тому числі в умовах знижених температур. Їх виробництво базується на комплексному використанні технології отримання чистих сталей, мікро легованих елементами, що впливають на структурну перекристалізацію сталі в процесі контрольованої прокатки.

Вимоги, що пред'являються до магістральних трубопроводів будуть тільки зростати. Це пов'язано зі збільшенням тиску в газопроводах, а також виробленням нових родовищ, де для доставки газу сталь повинна витримувати найсуворіші умови експлуатації.

Основною концепцією в розробці сучасних високоміцних сталей є забезпечення транспортування великих обсягів газу і нафти на великі відстані в поєднанні з достатньою надійністю, що дозволяє уникнути протяжних тендітних і в'язких розривів.

Незважаючи на світову рецесію в області виробництва сталі і металопродукату, трубна продукція ПрАТ «ММКІ» як і раніше є затребуваною. Це пов'язано як з високими стандартами якості продукції комбінату, так і з наявністю власних сучасних прокатних станів на ряду з трубоелектрозварювальним виробництвом.

Ключовою проблемою цеху в виробництві трубних марок сталі була неможливість ефективного видалення неметалевих включень, що в подальшому призводило до зниження фізико механічних властивостей готового прокату.

Сучасний комплекс позапічної обробки сталі і МБЛЗ конвертерного цеху ПрАТ «ММКІ», поставлений компанією Primetals Technologies, дозволяє досягати найвищої якості в виплавці і розливанні трубних марок сталі. З аналізу роботи комплексу слідує, що найбільш вимогливою до вмісту шкідливих домішок є марка, сталі 10Г2ФБ, яка є аналогом марки сталі для великого діаметру четвертого покоління Х70. Виробництво в умовах комбінату високоякісних трубних марок сталі мікролегованих Ti, V і Nb вимагає жорсткого дотримання технології їх позапічної обробки і розливання. Трубна продукція цеху відповідає найвищим європейським стандартам якості.

Основний матеріал дослідження. Сталь Х80 відрізняється від сталі Х70 великим вмістом Mo, Nb, Ti, Cu і Ni, а також іншим режимом конвертерної плавки, крім того вимоги до сталі Х80 по НВ і шкідливих домішок вищі.

Під час інтенсивної продувки металеві ванни інертним газом є швидке видалення неметалевих включень за рахунок інтенсивного їх укрупнення. Видалення НВ зі сталі в шлак може здійснюватися за рахунок флотації суспензії спливаючими бульбашками і прискореного укрупнення їх в потоках, що утворюються. Рафінуючи продування доцільно здійснювати в режимі дрібних бульбашок, рівномірно розподілених за обсягом розплаву.

Іншою важливою умовою швидкого видалення зі сталі твердих частинок (продуктів розкислення) є зустрічі з рідкими включеннями. При зустрічі твердої частинки з рідким включенням перша створює підвищений тиск на межі розділу і забезпечує його швидкий прорив, а друга швидко розтікається після утворення периметра змочування.

Ймовірність прикріплення бульбашки до твердої частинки складається з трьох етапів: потоншення плівки, прорив плівки і її стабілізація.

Встановлено [3], що для здійснення останніх 2-х етапів ймовірність стоншення плівки порівнянна з можливістю прикріплення міхура до неметалевого включення. У свою чергу, ймовірність прикріплення включення зростає при зменшенні розміру бульбашки і збільшенні розміру частинок, що описується рівнянням Нав'є - Стокса. Це рівняння може бути

застосовано для поздовжнього симетричного і асиметричного потоків бульбашок з числом Рейнольда. $Re < 400$ [5, 6].

Результати розрахунків ефективності видалення неметалевих включень за рівнянням $\varepsilon = (1 - e^{-K\tau})100$, де τ - час перебування НВ в області рідкої ванни проміжного ківшу, що продувається; K – константа, яка залежить від швидкості витікання газу в одиниці площі, температур сталі і газу в газорідному потоці та діаметру бульбашки.

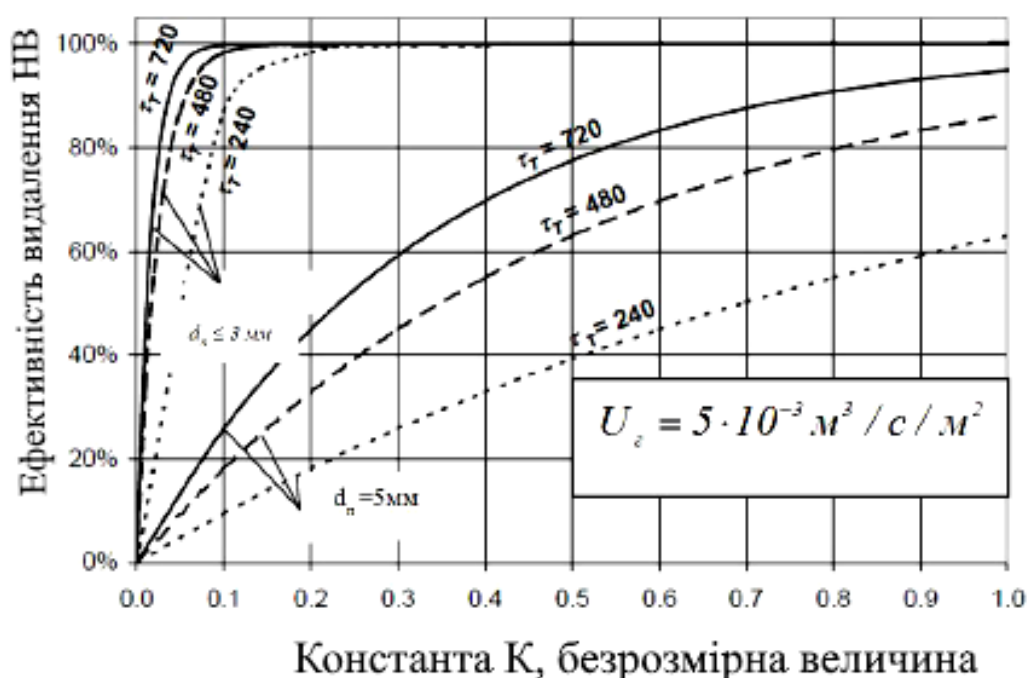


Рисунок – Вплив розміру бульбашки, обсягу області, що продувається і резидентного часу в проміжному ківшу на ефективність видалення неметалевих включень.

Для неметалічних частинок діаметром 40 мкм, як показано на рисунку, висока ефективність видалення неметалевих включень для бульбашок газу діаметром d_n менше чи дорівнює 3 мм практично не залежить від довжини області, що продувається газом, і часу перебування металу в проміжному ківші в діапазоні 240-720 секунд. У той же час для бульбашок газу розміром більше 5 мм обсяг області, що продувається і час перебування в ній рідкого металу істотно впливають на ефективність видалення включень.

В роботі [6] на модельних експериментах також було показано, що для високої ефективності видалення неметалевих включень (>80 %) розміром менше 60 мкм необхідно використовувати бульбашки газу розміром менше 3 мм.

У промислових умовах продування сталі аргонем в дрібнодисперсному режимі викликає певні технічні труднощі, обумовлені, перш за все, виготовленням продувних блоків з відповідною пористістю. Як правило, матеріал, з якого виготовлений продувний блок, не змочується рідкою сталлю. У дослідженнях [14-15], проведених на холодних і гарячих моделях при подачі газу через матеріал, що не змочується, показано, що бульбашка, яка виходить, розширюється на поверхні вогнетривкового матеріалу. Це ускладнює можливість контролю розмірів бульбашок, що утворюються, оскільки через отвір виходить міхур, який вже сформувався. Також існує можливість з'єднання бульбашок при їхньому відділенні від поверхні продувного блоку. При цьому бульбашковий режим продувки формується при досить малій витраті продувається газу. Характерною особливістю такого режиму продувки є утворення окремих бульбашок безпосередньо перед отворами для подачі газу. Зі збільшенням

Металургія

витрати вдувного газу спочатку збільшується частота утворення бульбашок, які зберігали колишній постійний обсяг. Надалі зберігається постійна частота утворення бульбашок, але збільшується їх обсяг.

Продувальні блоки забезпечували стабільну газопроникність протягом усього періоду експлуатації і можливість оперативного корегування величини витрати газу при продувці в діапазоні від 6 до 16 л/хв.

Порівняльний аналіз ефективності трансформації характеру перемішування сталі в проміжному ківші при наявності продувних балок на кількість і склад неметалевих включень в безперервно литих слябах і готовому прокаті досліджували шляхом розливання 8 дослідно-промислових серій (6-10 плавок в кожній) на МБЛЗ №1. В ході досліджень розлиті серії для низьковуглецевих, над низьковуглецевих і трубних марок сталі.

Для оцінки стану поверхні з досвідчених і порівняльних слябів відбиралися зразки (по кутах і серединах граней). Оцінку виконували після видалення окалини шляхом травлення в 50 % розчині соляної кислоти при 70 °С за методикою інституту ЦНДІ Чермет. Узагальнюючи результати оцінки якості поверхні досвідчених і порівняльних зразків, слід зазначити наявність явно виражених «слідів» осциляції з кроком, відповідним режиму хитання кристалізатора (близько 5 мм) і глибиною канавки до 0,9-1,0 мм, що відповідає 0 балу відповідно до вищевказаної методикою для обох випадків. Тим часом видимих істотних відмінностей між зразками з досвідчених і порівняльних злитків відзначено не було.

Оцінку забрудненості сталі здійснювали на полірованих шліфах з використанням мікроскопа «Axiovert-200» в світлому, темному і DIC полях при збільшенні $\times 100$ по ГОСТ1778-70 і ASTM E45-97 (метод найгірших полів). Зразки для досліджень відбиралися з готової продукції (листової сталі, прокатої з сляба до товщини 25 мм). Встановлено, що за більшістю показників отримані для порівняльного і досвідченого металу результати досить близькі між собою. Найбільші відмінності спостерігаються в показнику «точкові включення». Як показали спостереження, вони в переважній більшості мають округлу або овальну форму.

Розміри таких неметалічних включень, як правило, не перевищували 50-55 мкм. При цьому максимальний бал для досвідчених і порівняльних слябів дорівнює 2. Однак в досвідчених слябах кількість великих поодиноких включень (1,5 балу і вище) на 10-25 % нижче. Кількість поодиноких великих неметалевих включень зростає при розливанні сталей з наднизьким вмістом вуглецю. При цьому різниця в кількості включень в дослідному і порівняльному металі досягала 20-25 % при вдування через продувний блок аргону з витратою 10-12 л/хв.

При більш високих витратах аргону (наприклад, 15-16 л/хв) спостерігається інтенсивне нуртування металу і шлаку в зоні виходу бульбашок аргону, що обумовлює додаткове забруднення сталі в проміжному ківші.

Згідно з отриманими даними при інтенсивному бурлінні в дослідному металі спостерігається деяке збільшення кількості великих неметалевих включень (бал 2 і бал 2,5). Цей факт слід розглядати як свідчення того, що вдування аргону в проміжному ківшу має бути обмежена певними витратами, які не викликає бурління.

Аналізуючи причини наявності або виявлення великих неметалевих включень у відібраних пробах слід, перш за все, прийняти до уваги той факт, що вони мають переважно округлу форму. Ці включення являють собою оксисульфідні конгломерати, що включають такі елементи як кремній, алюміній, кальцій, сірка, кисень і інші. Це можна розглядати як свідчення того, що неметалеві включення є частинками захопленого в перемішування шлаку або конгломератами злиплих між собою частинок оксидів (продуктів розкислення і вторинного окислення) і сульфідів.

ВИСНОВКИ

У статті проведено аналіз світової тенденції і технологій виробництва сталі для нафтогазопровідних труб великого діаметру четвертого і п'ятого покоління. Лідируючими за якості виробництва цих сталей є країни Європи і Японії.

Підприємства України мають ряд проблем, що заважають їм вийти на світовий рівень виробництва цих марок сталі:

- 1) погана якість сировини;
- 2) фізичний і моральний знос обладнання;
- 3) слабо розвинена позапічна обробка металу;
- 4) застаріле проектування цеху і внутрішньої цеховий логістиці, що не дозволяє провести модернізацію (наприклад, майданчики цеху не дозволяють встановити сучасні агрегати позапічної обробки сталі);

- 5) недосконала логістика всередині комбінату що не дозволяє використовувати деякі сучасні агрегати і засоби (наприклад, кут поворотів залізничного полотна на більшості підприємств країни не дозволяє використовувати чавуновозі міксерного типу).

Застосування проміжного ківшу з повно профільними перегородками дозволяє знизити вміст включень всіх типів (в першу чергу розміром більше 20 мкм), яка зменшилася в 1,8 - 2,2 рази. Видалення зі сталі більш дрібних включень (менше 20 мкм) досягаються шляхом створення за перегородкою проміжного ківшу суцільний завіси з бульбашок аргону, що подається через пористий блок.

У роботі було проведено аналіз проблем, які заважають комбінату «ім. Ілліча» стабільно отримувати якісну сталь категорії міцності Х70. Впровадження мікролегування бором дозволить значно поліпшити показники і якість продукції, що випускається.

Видалення НВ зі сталі в шлак може здійснюватися за рахунок флотації суспензії.

Рафінуючи продування доцільно здійснювати в режимі дрібних бульбашок, рівномірно розподілених за обсягом розплаву.

Умовою швидкого видалення зі сталі твердих частинок (продуктів розкислення) є їх зустрічі з рідкими включеннями.

Для неметалічних частинок діаметром 40 мкм, як показано на рисунку, висока ефективність видалення неметалевих включень для бульбашок газу діаметром менше чи дорівнює 3 мм практично не залежить від довжини області, що продувається газом, і часу перебування металу в проміжному ківші в діапазоні 240-720 секунд.

У той же час для бульбашок газу розміром більше 5 мм обсяг області, що продувається і час перебування в ній рідкого металу істотно впливають на ефективність видалення включень.

Зразки для досліджень відбиралися з готової продукції (листової сталі, прокатаної з слябу до товщини 25 мм).

При оцінці забрудненості сталі встановлено, що за більшістю показників, які отримані для порівняльного і досвідченого металу, результати досить близькі між собою. Найбільші відмінності спостерігаються в показнику «точкові включення». Як показали спостереження, вони в переважній більшості мають округлу або овальну форму.

Кількість поодиноких великих неметалевих включень зростає при розливанні сталей з наднизьким вмістом вуглецю. Різниця в кількості включень в дослідному і порівняльному металі досягала 20-25 % при вдування через продувний блок аргону з витратою 10-12 л/хв.

При високих витратах аргону (наприклад, 15-16 л/хв) спостерігається інтенсивне бурління в дослідному металі та спостерігається деяке збільшення кількості великих неметалевих включень (бал 2 і бал 2,5).

При інтенсивному бурлінні вдування аргону в проміжному ківшу має бути обмежено певними витратами, які не викликають бурління рідкого металу.

Металургія

Великі неметалеві включення у відібраних пробах мають переважно округлу форму. Ці включення являють собою оксисульфідні конгломерати, що включають такі елементи як кремній, алюміній, кальцій, сірка, кисень і інші.

Список використаних джерел

1. *Bakolas Th., Neutjens J., Cantinieaux P., Harlet Ph.* Development of high strength for line pipe applications in a wide strip mill (from API X60 to X85) // Proceedings of the 3rd International Pipeline Technology Conference, Brugge, Belgium, May 21-24, 2000. P. 247-263.
2. *Barthel H., Hammerer W., Suppaner M.* Segment Purging Plugs for Steel Treatment in Ladles // Taikabutsu – Refractories. 1998. 50. No3. – P.128-136.
3. *Bleck W., Massip A., Meyer L., Muschenborn W.* How to Improve Mechanical Properties of High Strength Steels for the Automotive Industry. Proceeding of Int. Conf. of technology and application of HSLA steels. 1983. Philadelphia. P. 337-344.
4. C. M. Spinelli, eni g&p division/ L.Prandi, eni g&p division/ 7th Pipeline Technology Conference 2012 – High Grade Steel Pipeline for Long Distance Projects at Intermediate Pressure D Tech, 6, 1990, P. 1131-1138.
5. *Davies R.M., Taylor G.* The Mechanics of Large Bubbles Rising through Extended Liquids and through Liquids in Tubes // Proceeding the Royal of Society A. 1950. Vol. 200. № 1002. February. – P.375 – 390.
6. *Dobby G.S., Finch G.H.* Particle size dependence in flotation derived from a fundamental model of the capture process // International Journal of Mineral Processing. 1987. № 21. – P.241 – 260.
7. *Taira T., Tsukada K., Kobayashi Y., Tanimura M., Inagaki H., and Seki N.* HIC and SSC Resistance of Line Pipes for Sour Gas Service Development of Line Pipes for Sour Gas Service // Nippon Kokan Technical Report Overseas. 1981. No. 31. P. 1-13.
8. *Tassot P.* Innovative concepts for steel ladle porous plugs // Millenium Steel. 2006. – P.111-115.
9. *Tassot P., Reichert N.* Ways of Improving Steel Quality in the Tundish // Revue de Metallurgie. – 107. – 2010. - Pp.175-185.
10. *Wang M. X., He L. X.* Effect of boron on structure and properties of low carbon bainitic steels // ISIJ International. 2002. Vol. 42. Supplement. P. 38 –46.
11. *Yogeshwar Sahai, Toshihiko Emi.* Tundish Technology for clean steel production / The Ohio State University, USA; Institute of research of Iron and Steel, Jangsu/ Sha – Steel, China. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2008. – 329 p.
12. *Gladman T.* // Int. Conf.Clean Steel4.The Institute of Materials. London. 1992. P. 3-24.
13. *Gladman T. Dulieu D., Me Ivor I. D.* // Proceedings Microalloying 75, Union Carbide Corp. New York. 1977. P. 32-55.
14. *Gray J. M.* Alloy design options and compositional trends for HSLA line pipe // Proceedings of the International Conference “Microalloying ‘88” held in Chicago, Illinois, USA. September 24-30, 1988. P. 61-66.
15. *Hillenbrand H.G., Heckmann C.J., Niederhoff K.A./* EUROPIPE GmbH, Ratingen, Germany/ X80 line pipe for large-diameter high strength pipelines.

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF CASTING PIPE STEEL GRADES

Modern steel production in metallurgy is dictated by the continuous tightening of requirements for metal quality. Along with the reduction in the level of harmful impurities (sulfur, phosphorus, gases, non-ferrous metals), increasing attention is paid to the degree of purity of steel in terms of non-metallic inclusions (NIM), which affects the anisotropy of properties, the threshold of cold brittleness, weldability, susceptibility to aging, etc.

Converter production has the greatest potential in the steelmaking sector due to its reliability and high cost-effectiveness. The development of technologies for the production of oil and gas pipelines is one of the most promising and sought-after industries in modern metallurgy. Analysis of the economic situation by leading specialists and scientists has shown that the price of oil and gas will steadily increase every year. This is due to the constant depletion of existing deposits and high resource and energy costs for the development of new deposits.

Therefore, the construction of reliable oil and gas pipelines will be the primary task of metallurgical enterprises that have managed to master modern technologies for smelting pipes of the 4th and 5th generations, which will always be competitive in the market.

The paper reviews global trends in the production of high-strength large-diameter oil and gas pipelines in European countries, Japan and Ukraine. Conclusions are drawn about the prospects for the development of technologies in this area for our country.

Using global trends, an analysis of the possibilities of producing steel for oil and gas pipelines of the fourth and fifth generations at the Mariupol Ilyich Steel Plant (MMKI) was performed, as well as an analysis of problems that may arise during the smelting of these steels.

Keywords: oxygen-converter production, steel, technological cycle, product range, continuous casting machine, mold, non-metallic inclusions, slab, quality.

Стаття надійшла 30.05.2025р.

УДК 669.162.22

doi.org/10.31498/2522-9990292025330252

Черевко О.О., Щербаков С.В.

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО КЕРУВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЮ ПЛАВКОЮ

У статті розглянуто проблеми підвищення ефективності конвертерного виробництва сталі шляхом впровадження автоматизованих систем з динамічним керуванням, що ґрунтуються на безперервному отриманні та обробці інформації про параметри технологічного процесу.

Проаналізовано існуючі підходи до математичного моделювання конвертерних процесів. Наведено можливості практичного застосування статичних та динамічних моделей, що використовуються для розрахунку шихти та матеріального балансу плавки, описують кінетику процесів, зокрема, швидкість знеуглецювання та зміну температури. Показано, що поєднання статичних і динамічних моделей дозволяє створити комплексну систему керування, здатну здійснювати автоматичне ведення технологічного процесу.

Метою дослідження є розробка програмного забезпечення, яке поєднує в собі функції статичного та динамічного розрахунку параметрів конвертерної плавки, а також забезпечує візуалізацію технологічних операцій та роботи конвертерного обладнання.

Запропоноване програмне забезпечення розроблене на базі 2D та 3D ігрового рушію загального призначення Godot Engine, що має такі переваги, як безкоштовність, кросплатформеність та підтримку різних мов програмування. Програмне забезпечення створене з використанням мови GDScript, 3D-моделей, розроблених у середовищі Blender, та скриптів, які описують поведінку окремих елементів системи. Програмне забезпечення реалізує візуалізацію основних етапів конвертерної плавки та керування технологічним обладнанням. Окрім візуалізації, програма моделює процеси конвертерної плавки на базі статичних та динамічних розрахунків.

Розглянуті моделі адекватно відображають реальні процеси конвертерної плавки. Розроблене програмне забезпечення може бути використане як для автоматичного керування технологічним процесом, так і для навчання та тренування персоналу. Впровадження системи динамічного керування конвертерною плавкою дозволить підвищити ефективність конвертерного виробництва, покращити якість сталі та зменшити собівартість продукції.

Ключові слова: *киснево-конвертерний процес, комп'ютерне моделювання, візуалізація, статична та динамічна модель конвертерної плавки, система автоматичного регулювання.*

Постановка проблеми. Проаналізувавши проблеми автоматизації конвертерного виробництва, можна дійти висновку, що у вітчизняних конвертерних цехах відсутня велика кількість елементів, які широко використовуються на закордонних підприємствах і здійснюють суттєвий вплив на показники якості сталі, ресурсо-, енергозбереження та екологію.

Одним з найбільших недоліків є відсутність ефективної автоматизованої системи з динамічним керуванням процесом виплавки сталі. З її допомогою можуть бути отримані найбільш точні результати, але вона є доволі складною і потребує постійного і безперервного надходження дискретної інформації про параметри сталеплавильної ванни. Знання цих параметрів дозволило б корегувати розрахунки по ходу плавки і тим самим надавати точніші кінцеві результати [1]. Робота такої системи базується на динамічній моделі, яка забезпечує розрахунок прогнозованої маси рідкої сталі, швидкості знеуглецювання, вмісту вуглецю під час продувки і додувки, а також здійснює контроль температури конвертеру і процесу шлакоутворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найважливішими параметрами конвертерної плавки є швидкість знеуглецювання і вміст вуглецю. Процес знеуглецювання проходить у дифузійному режимі, та при $[C] < 0,15-0,2 \%$ відбувається заміна абсорбційного шару на поверхні металу, тобто реакція переходить в стадію лімітування переносу вуглецю з об'єму ванни до поверхні реагування. Подальші дослідження дозволили розвинути теорію і довести, що критичний вміст вуглецю залежить від технічних параметрів процесу [2]. На початку продувки при високій масовій частці вуглецю швидкість його окислення залежить від інтенсивності подачі кисню в зону реакції, тому що знеуглецювання переважно протікає на міжфазній поверхні в зоні контакту дуттєвого струменя з ванною. У зв'язку з великим окислювальним потенціалом в реакційній зоні одночасно окислюються всі елементи чавуну. При цьому основний гальмівний вплив на процес знеуглецювання ванни чинять процеси окислення кремнію і марганцю, які мають більш сильну спорідненість до кисню. При температурі розплаву $1350-1400^{\circ}\text{C}$ починається інтенсивне знеуглецювання конвертерної ванни, причому максимальна швидкість окислення вуглецю досягається в середині плавки [3]. Ґрунтуючись на цих дослідженнях, були запропоновані два алгоритми визначення масової

Металургія

долі вуглецю у ванні: за балансом вмісту вуглецю не нижче 0,6 % [4] та за різницею об'ємної щільності випромінення факелу в двох спектральних областях для вмісту вуглецю нижче 0,6 % [2].

Також існує інша модель, яка розглядає процес зневуглецювання як два кінетичні періоди [3]. Перший період описується рівнянням, відповідним пропорційній ланці. У другому кінетичному періоді, що настає за умови однакової кількості дифузійних потоків вуглецю і кисню, швидкість зневуглецювання описується рівнянням, яке відповідає інерційній ланці першого порядку. Швидкість зневуглецювання знаходиться через об'ємні витрати кисневого дуття з урахуванням чистоти та втрат дуття та масової частки вуглецю ванни, який окислюється до CO в порожнині конвертера за рахунок кисню дуття.

З вищенаведеного витікає, що галузь використання математичного моделювання в автоматизації конвертерного виробництва є достатньо вивченою. Існують моделі, які здатні прорахувати наперед ті чи інші параметри, які складно, або навіть неможливо визначити шляхом прямих замірів або без припинення виробничого процесу. Окрім дослідження динамічних моделей, відбувається дослідження, вивчення і використання на практиці статичних моделей. Їх сутність полягає в тому, щоб знайти витрати матеріалів, які необхідні для виплавки сталі заданої кількості, хімічного складу і температури, тривалість плавки і продуктивність агрегату. Зазвичай розрахунки плавки відбуваються в певний послідовності. Спочатку визначають параметри плавки, які треба отримати в кінці продувки. Потім обчислюють витрати лому, окислення домішок металевої шихти, кількість і склад шлаку. Важливим параметром для розрахунку є витрати дуття. Після нього зазвичай розраховують вихід рідкої сталі перед розкисненням і складають матеріальний баланс плавки. Наступним етапом є розрахунок теплового балансу і температури металу, його розкислення і хімічного складу, а також витрати матеріалу на всю плавку і вихід продуктів плавки. Заключним є визначення питомої інтенсивності продувки, довготривалості плавки і продуктивності агрегату [5]. В сукупності між собою динамічна і статична моделі становлять замкнуту систему, яка теоретично могла б керувати технологічним процесом самостійно, без втручання людини.

Метою роботи є розробка програмного забезпечення, що реалізує статичний та динамічний розрахунок параметрів конвертерної плавки, а також візуалізацію технологічних операцій та роботи технологічного обладнання.

Основний матеріал дослідження. Програма візуалізації киснево-конвертерного процесу (рис. 1) розроблена на базі ігрового рушію загального призначення Godot Engine та базується на статичній та динамічній моделях конвертерної плавки. Вагомою перевагою цієї платформи є те, що вона є безкоштовною, себто доступною для кожного. Середовище розробки може працювати на Linux, OSX, Windows та інших операційних системах та експортувати проекти на ПК, консолі, мобільні та веб-платформи. Скриптинг у цьому середовищі відбувається за допомогою вбудованої мови GDScript, синтаксис якої має спільні елементи з Python. Деякі версії Godot підтримують мови програмування C, C# та C++, які є доволі популярними в галузі промислової автоматизації.

Увесь проект являє собою сукупність 3D моделей, розроблених в програмі для моделювання Blender, та підключених до них скриптів, які представлені окремими класами.

Металургія

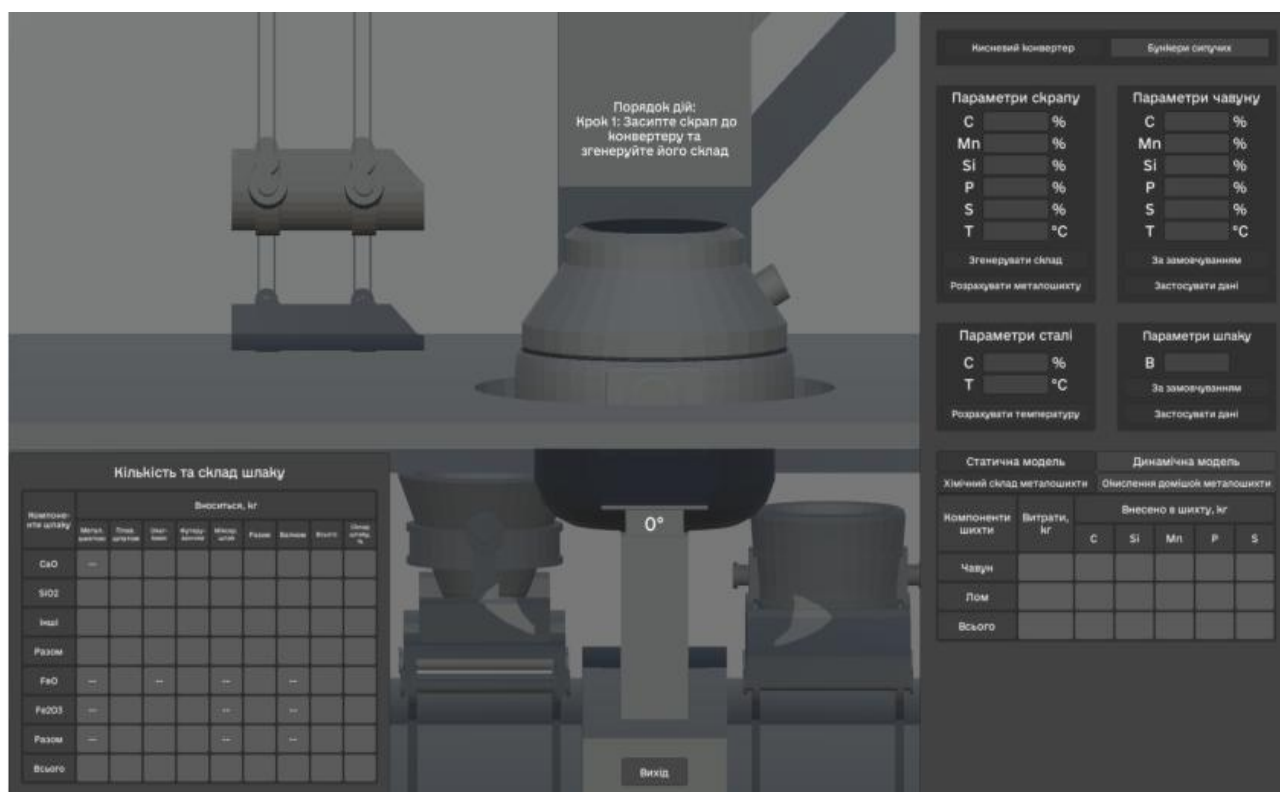
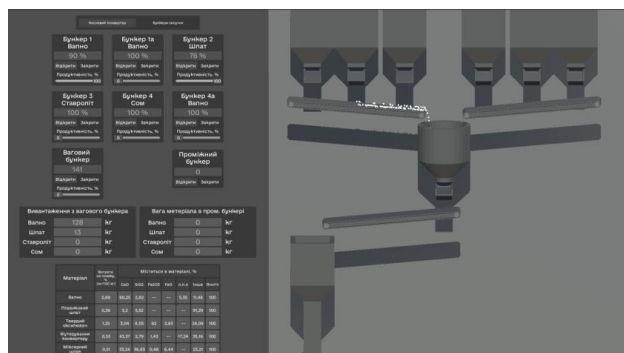


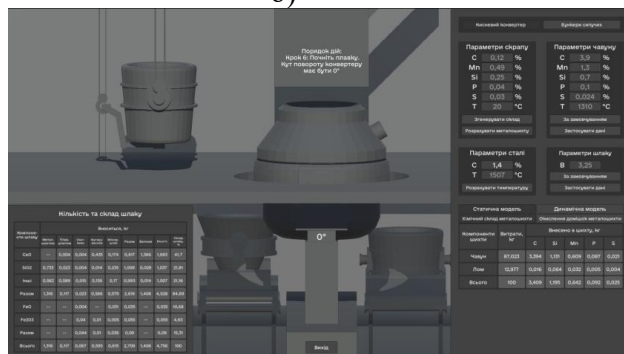
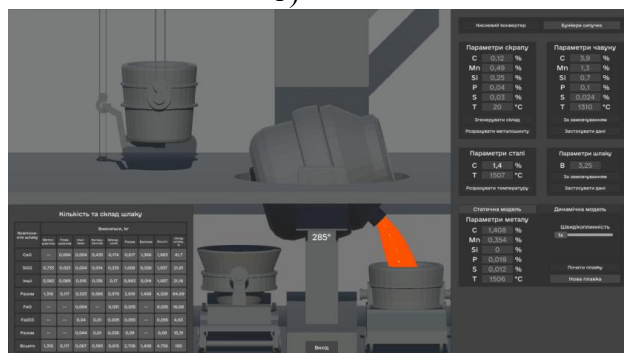
Рисунок 1 – Головне вікно програми

Розроблений проект написаний на GDScript. Це найбільш зручна мова для написання скриптів. Скриптування відбувається за рахунок підключення скрипту до певного об'єкта проекту. Сам проект має структуру вузлів або так званих Node. В проекті є головний вузол, а всі інші приєднуються до нього. Чим ближче вузол знаходиться до головного, тим більше доступу він має до інших вузлів. Тобто він має доступ та може керувати тільки залежними від нього вузлами. Деякі вузли можуть виступати в ролі сцен. Сцена – це вузол, який може бути залежним або працювати окремо від інших. Найголовніший вузол можна вважати сценою. Вузол уявляє собою набір елементів із певної бібліотеки. В розробленому проекті використані такі елементи, як KinematicBody2D, RigidBody2D та StaticBody2D. Залежними від них є Sprite, CollisionShape2D та CollisionPolygon2D. Перші необхідні для опису фізичних властивостей об'єкта, а другі – його зовнішнього вигляду та форми. Кожен з цих елементів має безліч властивостей, змінюючи які за допомогою скриптів можна отримати бажаний результат. Наприклад, в програмі на базі скриптів реалізовано анімацію руху конвертеру, фурми, совку для подачі скрапу, сталь ковш та рухомого складу. Ними можна керувати за допомогою клавіатури комп'ютера.

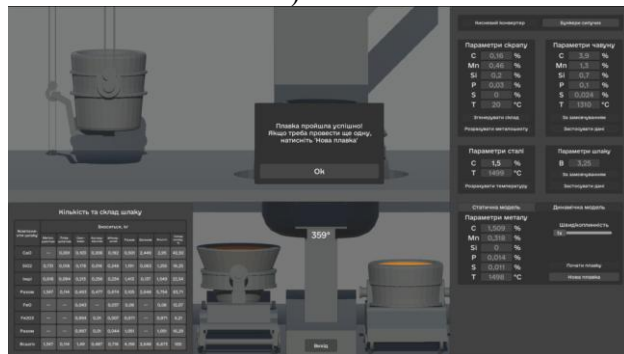
Окрім візуальної частини проект містить модель розрахунку та симуляції киснево-конвертерної плавки. Цей блок був реалізований як окрема сцена, а потім вбудований до основної. Він складається зі статичного та динамічного розрахунків конвертерної плавки та симуляції плавки на їх основі (рис. 2). Результати розрахунків відображаються на панелях з таблицями.



6)

 $\Gamma)$ 

e)



3)

80

Металургія

Всього проект налічує 22 скрипти, які реалізують:

- поведінку витратних бункерів: зміну положення заслінки бункеру, заповнення шихтовими матеріалами в певних межах, контроль рівню та кількості матеріалу, висипання шихтових матеріалів з бункеру;
- поведінку проміжного бункера: підрахунок кількості того чи іншого шихтового матеріалу, що завантажується в бункер, та їх загальної кількості;
- поведінку вагового бункера: підрахунок кількості того чи іншого шихтового матеріалу, що завантажується в бункер, та їх загальної кількості, реакція на потрапляння або висипання матеріалу з бункера;
- поведінку сталі ковша: заливання сталі до конвертера, переміщення сталі ковша;
- поведінку кисневого конвертера: анімація зливу сталі та шлаку в кінці плавки, розрахунок кута повороту конвертера за внутрішніми координатами та анімація повороту;
- поведінку електровібраційних живильників: завдання продувності та переведення значення продуктивності у вплив на електровібраційний живильник;
- поведінку кисневої фурми: розрахунок та зміна її положення;
- поведінку совку зі скрапом: формування скрапу, переміщення совку, анімація засипання скрапу до конвертера;
- поведінку рухомого складу: анімацію заміни ковша на совок та навпаки, керування шлаковозом та сталевозом;
- поведінку шлаковоза: наповнення шлаковоза шлаком, відслідковування готовності шлаковоза до зливу шлаку;
- поведінку сталевоза: наповнення сталевоза сталлю, відслідковування готовності сталевоза до зливу сталі;
- надання підказок для покрокового виконання технології плавки;
- присвоєння параметрам чавуну значень за замовчуванням або значень, які були введені користувачем;
- присвоєння основності шлаку значення за замовчуванням або значення, введенного користувачем;
- розрахунок статичної моделі;
- розрахунок кінцевої температури сталі в залежності від вмісту вуглецю;
- генерацію ступеня видалення шкідливих домішок у кінці продувки в залежності від вмісту вуглецю;
- генерацію вмісту оксидів заліза в шлаку в залежності від вмісту вуглецю в кінці продувки;
- генерацію складу неметалевих матеріалів для розрахунків кількості та складу шлаку;
- окислення вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору, сірки;
- розрахунок атомарної концентрації вуглецю в металі;
- виведення результатів усіх розрахунків у таблиці.

У програмі передбачено присвоєння вихідним параметрам розрахунку значень, введених користувачем, якщо програма працює як частина динамічної системи керування плавкою, або значень за замовчуванням, якщо програма використовується як симулятор для навчання.

Вихідними даними для моделювання є параметри хімічного складу чавуну та параметри сталі, які необхідно отримати. Параметри лому зазвичай невідомі під час реальної плавки, але вони варіюються в певних межах. Ґрунтуючись на цьому, склад лому генерується випадковим чином. Розраховуються витрати лому з корекцією за охолоджувальною здатністю окатишів та температури металу. За визначеними витратами лому знаходяться витрати чавуну. За отриманими даними визначається загальний вміст елементів у металошихті. Далі знаходиться

Металургія

залишковий вміст домішок у металі в кінці продувки. Кількість домішок, які видаляються під час продувки, знаходиться як різниця між їх вихідним і залишковим вмістом після продувки. Ці дані необхідні для розрахунку кількості кисню, яка необхідна для окислення. На цьому статичний розрахунок завершується.

Наступним етапом є динамічний розрахунок, який базується на розрахунках статичного. Він полягає у визначенні інтенсивності видалення вуглецю та інших домішок залежно від зміни часу продувки. В програмі передбачена зміна витрат дуття, що дозволяє дослідити зміну швидкості, з якою видаляється елемент.

ВИСНОВКИ

Реалізовані в програмі моделі адекватно відображають процеси, що протікають у ванні конвертера. Моделі дозволяють здійснити розрахунок шихти на плавку, безперервно по ходу продувки здійснювати контроль і регулювання найбільш важливих параметрів металу за допомогою управління кисневою фурмою, визначати швидкості знеуглецювання, зміни температури і окислення заліза ванни.

Розроблене програмне забезпечення може використовуватися в системі автоматичного керування конвертерною плавкою, що дозволить збільшити точність управління, підвищити якість виплавленої сталі та економічність процесу. Також програма може бути застосована в якості тренувальної та / або навчальної для обслуговуючого персоналу, технологів та фахівців з автоматизації.

Список використаних джерел

1. Величко, А. Г. АСУТП в конвертерному виробництві: Підручник. / А. Г. Величко та ін. – Дніпро: НМетАУ, 2016. – 245 с.
2. Богушевський, В. С. Замкнена система управління киснево-конвертерної плавкою / В. С. Богушевський // Лиття та металургія. – 2013. – № 3. – С. 207-211.
3. Богушевський, В. С. Знеуглецювання сталі як основний параметр оптимального управління киснево-конвертерним процесом / В. С. Богушевський, С. Г. Мельник, С. В. Жук. – Київ: КПІ, 2014. – 416 с.
4. Сорокін, М. О. Дослідження інформації про температуру газів, що відходять, в АСУ конвертерним процесом / М. О. Сорокін, В. М. Глухівська // Розробка та експлуатація ефективних систем і засобів автоматизації сталеплавильного виробництва. – 1982. – С. 13 – 18.
5. Шаповалов, А. М. Технологія і розрахунок плавки у кисневому конвертері / А. М. Шаповалов. – Новотроїцьке: НДТУ «МІСіС», 2011. – 40 с.
6. Бойченко, Б. М. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник. / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотський, П. С. Харлашин. – Дніпро: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.
7. Богушевський, В. С. Комп'ютерна модель розрахунку шихти та продування конвертерної плавки / В. С. Богушевський, Г. Г. Грабовський, В. М. Михайлов та ін. // Сталь. – 2006. – № 1. – С. 18-21.

Cherevko O., Shcherbakov S.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR AN AUTOMATED DYNAMIC CONTROL SYSTEM FOR CONVERTER MELTING

The article considers the problems of increasing the efficiency of converter steel production by implementing automated systems with dynamic control, based on continuous receipt and processing of information about the parameters of the technological process.

Existing approaches to mathematical modeling of converter processes are analyzed. The possibilities of practical application of static and dynamic models used to calculate the charge and material balance of the melt, describing the kinetics of processes, in particular, the rate of decarburization and temperature change, are presented. It is shown that the combination of static and dynamic models allows creating a complex control system capable of automatically controlling the technological process.

The purpose of the research is to develop software that combines the functions of static and dynamic calculation of converter melting parameters, as well as provide visualization of technological operations and the operation of converter equipment.

The proposed software is developed on the basis of the 2D and 3D general-purpose game engine Godot Engine, which has such advantages as free, cross-platform and support for various programming languages. The software is created using the GDScript language, 3D models developed in the Blender environment, and scripts that describe the behavior of individual system elements. The software implements visualization of the main stages of converter smelting and control of technological equipment. In addition to visualization, the program models converter smelting processes based on static and dynamic calculations.

The considered models adequately reflect the real processes of converter smelting. The developed software can be used both for automatic control of the technological process and for education and training of personnel. The implementation of a dynamic control system for converter smelting will increase the efficiency of converter production, improve the quality of steel and reduce the cost of production.

Keywords: oxygen converter process, computer modeling, visualization, static and dynamic model of converter smelting, automatic control system.

Стаття надійшла 05.05.2025р.

УДК 621.771

doi.org/10.31498/2522-9990292025330254

Григоренко В.У., Заболотній О.М.

ПІДВИЩЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ТА МІЦНОСТІ І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВАРЮВАНOSTІ ХОЛОДНОГНУТИХ ШВЕЛЕРІВ

Швелери виробляють по технологіям гарячої прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки так і по технології холодного згинання смуги або листа.

Маловуглецеві сталі, що застосовуються при виробництві гарячекатаних швелерів дають можливість зварювання, але не мають високої міцності. Тому постає питання з підвищенням показників міцності метала швелерів.

Металургія

Швелери сталеві згинають в місцях між полкою та стійками. Але такий профіль поступається жорсткістю по зрівнянню з гарячекатаними швелерами. Тому постає питання щодо підвищення жорсткості швелерів виготовлених методом згинання.

В роботі запропоновано складові розвинутої технології виготовлення холодногнутих профілів. Першою складовою є застосування маловуглецевої сталі при контрольованій прокатки, де виконується інтенсивна термічна обробка, яка збільшує, в основному, показники міцності сталі. Друга складова - для підвищення жорсткості в останніх проходах на профілегибочних безперервних станах запропоновано локально нагрівати метал в зонах кутів та осаджувати полку і заповнювати кут в 90 градусів між полкою та стійкою.

Гнуті швелери виготовляють з низьковуглецевих сталей (сталь 20, СтЗсп,) з границями міцності 370-410 Н/мм² регламентованим за ДСТУ 2834-94. Виробництві гнутого швелера виконувати, наприклад, із сталі S355 де границя міцності досягає 630 Н/мм² по EN 10025-2:2022. При цьому зменшення маси погонного метра швелера по зрівнянню з гарячекатаним може досягати значних величин. Важливо те, що швелери зі сталі S355 можливо зварювати.

Ключові слова: швелери гарячекатані та холодногнуті, жорсткість, міцність, зварюваність, сталі з контролюємої прокатки, локальний нагрів, локальна деформація, зменшення маси погонного метра швелера.

Постановка проблеми. Швелер це важливий вид металургійної продукції, використовується для надання міцності та жорсткості конструкцій. Його особлива форма дає добрі результати при навантаженні на вигин і сприймає поздовжні навантаження. Така форма збільшує міцність і зменшує масу металоконструкції [1].

Для виробництва швелерів, що відповідають перспективним та сучасним критеріям якості, конкурентоспроможності, експлуатаційної надійності в Україні введені такі стандарти:

- ДСТУ 3436-96 «Швелери сталеві гарячекатані. Сортамент» [2];
- ДСТУ 8807:2018 «Балки двотаврові і швелери сталеві спеціальні. Сортамент» [3];
- ДСТУ 7551:2014 «Швелери. Сортамент» [4];
- ДСТУ 7549:2014. «Швелери сталеві гарячекатані з відігнутою полицею для вагонеток.

Сортамент». [5];

- ДСТУ 8808:2018 «Профілі сталеві гнуті. Технічні умови. [6].

Швелери виробляють по технологіям гарячої прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки так і по технології холодного згинання смуги чи листа.

Для швелерів застосовують сталі, що окрім міцності та жорсткості повинні мати можливість зварювання. Маловуглецеві сталі, що застосовуються при виробництві гарячекатаних швелерів дають можливість зварювання, але не мають високої міцності.

Це протиріччя вирішено при виробництві зварних труб.

Застосовують маловуглецеві сталі з низьким легуванням. Також застосовують маловуглецеві нелеговані сталі після так званої контрольованої прокатки де виконується інтенсивна термічна обробка яка збільшує в основному показники міцності сталі.

Виробництво гнутих швелерів дозволяє застосовувати сталі вироблені за технологіями контрольованої прокатки. Але при цьому кути між полкою та стійками є округленими і швелер не має необхідної жорсткості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвитку методів калібрування валків для прокатки сортової продукції в наш час приділяють увагу [7].

На сьогодні практика з виробництва швелерів має 5 основних способів прокатки швелерів, що відрізняються між собою формою чорнових калібрів:

- балочний спосіб прокатки;
- коритний спосіб прокатки;
- спосіб прокатки в калібрах із збільшеним ухилом дійсних фланців та вигнутої стінкою;

- спосіб прокатки у розгорнутих калібрах;
- прокатка за способом згинання.

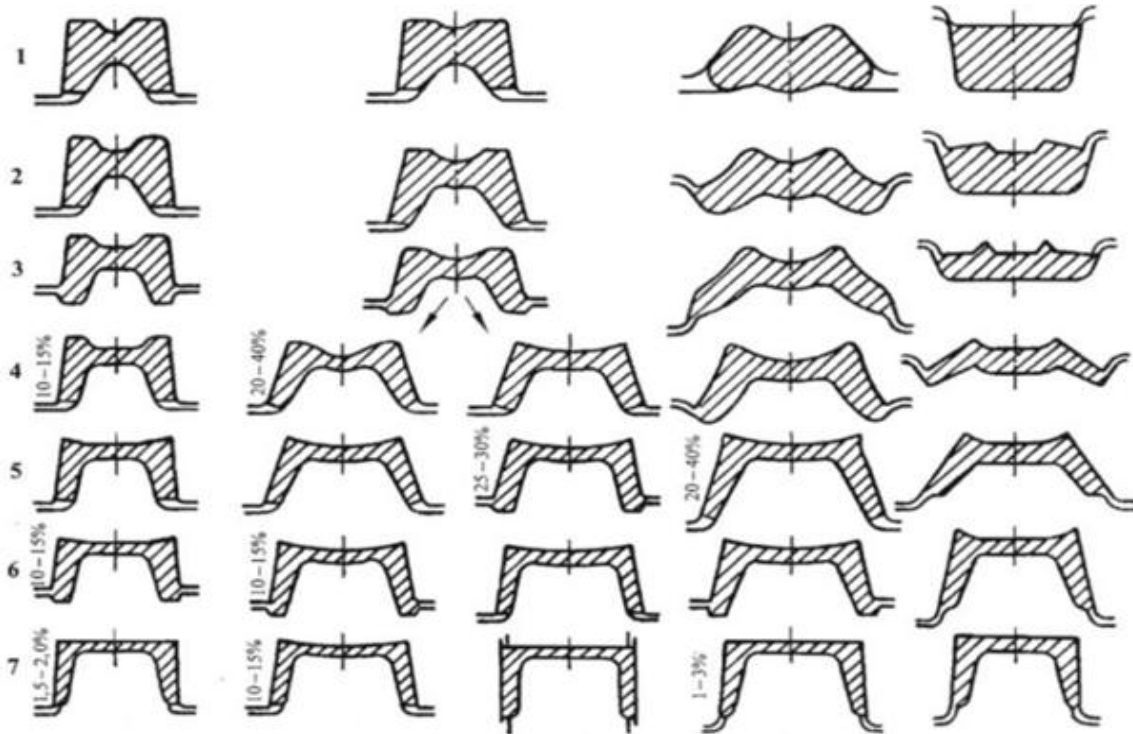


Рисунок 1 – Методи калібрування валків для прокатки швелерів: а – зі збільшеним ухилом дійсних фланців та прямою стінкою (коритний спосіб); б – зі збільшеним ухилом дійсних фланців та зігнутою стінкою; в – з застосуванням універсального чистового калібру; г – з розгорнутими дійсними фланцями та зігнутою стінкою; д – згинання прямих дійсних фланців [7]

Для формування чорнового профілю швелера з заготовки прямокутної форми майже у всіх методах використовують розрізні калібри (рис. 2).

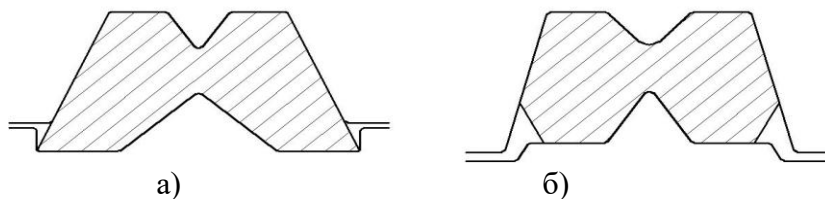


Рисунок 2 – Розрізні калібри: а - напівзакритий; б - закритий знизу

При цьому форми квадратної заготовки не є наближена до форми профіля і в процесі прокатки виникає велика нерівномірність деформування металу.

Особливістю при прокатці швелерів з заготовки квадратного профілю є забезпечення наявності фальшивих частин фланців в кутах між полкою та фланцями у чорнових калібрах (рис. 3).

Металургія

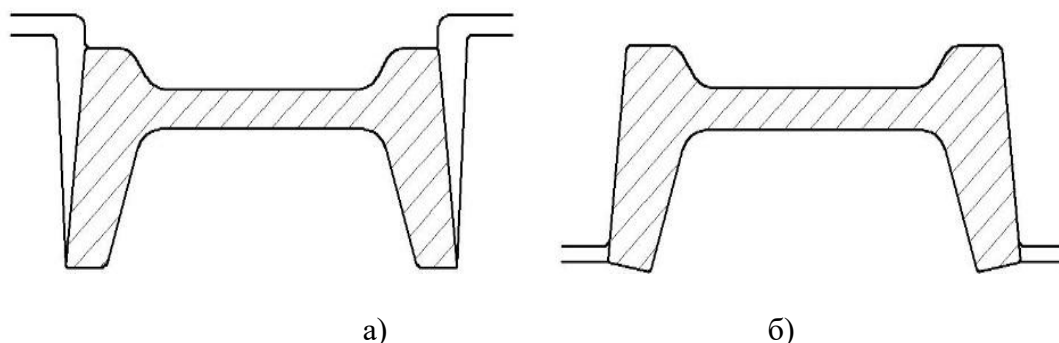


Рисунок 3 – Фальшиві фланці (в кутах між полицею та фланцями) у напівзакритому (а) та закритому (б) калібрах

Це потрібно для забезпечення в калібрах наступних клітей кута в 90 градусів між полицею та фланцями. Це присутнє більшості методів калібрування валків [6].

Всі ці засоби виробництва швелерів є досить енергоємні та потребують досить складних технологічних процесів та складної форми калібрів.

Значно менше потребують енерговитрат технології виробництва методом згинання.

Швелери сталеві гнуті відрізняється різноманітністю форм та розмірів, та регламентується ДСТУ 8808:2018 «Профілі сталеві гнуті. Технічні умови».

Візуально, від гарячекатаного швелера холодногнутий швелер відрізняється плавними округленими кутами вигину, однаковою товщиною всіх сторін, гладкою поверхнею (рис.4).

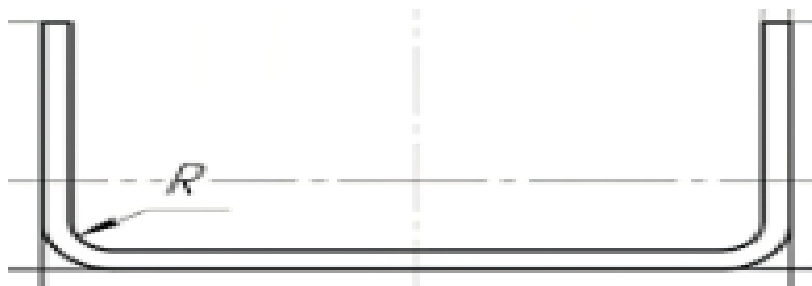


Рисунок 4 – Округленість між полкою та стійками в холодногнутому швелері

Виробництво гнутих профілей значно простіше і в порівнянні з гарячекатаним процесом не потребує значних енергетичних витрат на нагрів.

Швелери сталеві гнуті відносяться до фасонних профілів і мають характерну П-подібну форму. Їх виробляють методом холодного згинання листового металу або полос на профілезгинальних безперервних стана або механічних на механічних верстатах. Смути листової сталі згинають в зазначених місцях.

Але такий профіль поступається жорсткістю по зрівнянню з гарячекатаними швелерами.

Виробництво гнутих профілей значно простіше і в порівнянні з гарячекатаним процесом не потребує значних енергетичних витрат на нагрів.

Гнутий швелер виготовляється на спеціальних згинальних пресах чи на безперервних формовочних станах (рис. 5).



Рисунок 5 – Виробництво гнутих профілей [7]

При цьому гнутий профіль завдяки округленим кутам має меншу жорсткість в порівнянні із гарячекатаним. Тому постає питання щодо підвищення жорсткості швелерів виготовлених методом згинання.

Мета дослідження. Метою статті є представлення складових технології виробництва гнутих швелерів з металу контрольованої прокатки та з отриманням гострого кута у місці між полкою та стійками.

Це дасть можливість покращенню механічних властивостей таких як міцність і жорсткість в порівнянні із гарячекатаними та з холодногнутими.

Основний матеріал дослідження. Для усунення округлення кутів пропонується холодногнутий швелер в останніх проходах на профілегібочних безперервних станах попередньо нагрівати локально в зонах кутів між полкою до температури 1250 та осаджувати полку в сторону кута і заповнювати кут в 90 градусів між полкою та стійкою металом полки [8,9].

Розігрів локальних зон можливо двома засобами:

- газовими пальниками;
- індукційним нагріванням струмами високої частоти.

Після локального нагріву смуга буде піддаватись обтисненню в валках і при цьому завдяки нагріву пластична деформація буде проходити саме в зоні нагріву, формуючи гострий кут (рис. 6).

Після формування профілю можлива зміцнювальне охолодження деформованих ділянок профілю. Механічні властивості ділянок, які не були підтверджені нагріву та деформації залишаються незмінні.

Гнуті швелери виготовляють з низьковуглецевих сталей (сталь 20, СтЗсп,) з границями міцності 370-410 Н/мм² (кгс/мм²), регламентованим ДСТУ 2834-94 (ГОСТ 16523-97) «Прокат тонколистовий з вуглецевої сталі якісної та звичайної якості загального призначення. Технічні умови».

Металургія

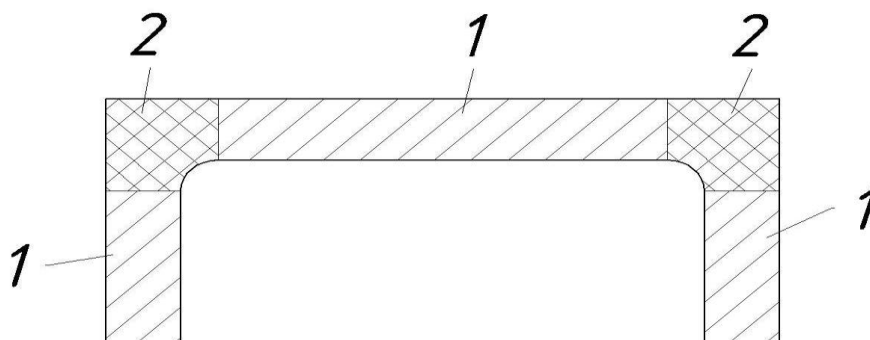


Рисунок 6 – Місце локального нагріву та локальної пластичної деформації холодногнутого швелера: 1 - зона, що не підлягала нагріву і деформації; 2 – зона локального нагріву та деформації

Виробництві гнутого швелера, наприклад, із сталі S355 де границя міцності досягає 630 Н/мм² по EN 10025-2:2022, при локальній гарячій деформації, а потім термообробці деформованих ділянок значно вплине на експлуатаційні властивості профіля згідно вимог споживача по перетину швелера.

Зменшення маси погонного метра швелера по зрівнянню може досягати значних величин. При цьому також значним є те, що швелери зі сталі S355 можливо зварювати.

ВИСНОВКИ

Маловуглецеві сталі, що застосовуються при виробництві гарячекатаних швелерів дають можливість зварювання, але не мають високої міцності.

Швелери сталеві згинають в місцях між полкою та стійками. Але такий профіль поступається жорсткістю по зрівнянню з гарячекатаними швелерами.

Тому постає питання щодо підвищення жорсткості та міцності швелерів виготовлених методом згинання.

В роботі запропоновано складові розвинутої технології виготовлення холодногнутих профілів:

- застосування маловуглецевої сталі контрольованої прокатки де виконується інтенсивна термічна обробка яка збільшує в основному показники міцності сталі;

- для підвищення жорсткості в останніх проходах на профілегібочних безперервних станах запропоновано локально нагрівати метал в зонах кутів та осаджувати полку і заповнювати кут в 90 градусів між полкою та стійкою.

Гнуті швелери виготовляють з низьковуглецевих сталей (сталь 20, СтЗсп,) з границями міцності 370-410 Н/мм² регламентованим за ДСТУ 2834-94. Виробництві гнутого швелера виконувати, наприклад, із сталі S355 де границя міцності досягає 630 Н/мм² по EN 10025-2:2022.

При цьому зменшення маси погонного метра швелера по зрівнянню з гарячекатаним може досягати значних величин. Значним є те, що швелери зі сталі S355 можливо зварювати.

Список використаних джерел

1. О. П. Максименко, М. М. Штода, О. В. Нікулін / Основи калібровки прокатних валків: Навчальний посібник. – Кам'янське: ДДТУ, 2023. – 156 с. <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/570>.
2. ДСТУ 3436-96 «Швелери сталеві гарячекатані. Сортамент» https://dnaop.com/html/62400/doc-ДСТУ_3436-96.
3. ДСТУ 8807:2018 «Балки двотаврові і швелери сталеві спеціальні. Сортамент» https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?d_doc=78666.
4. ДСТУ 7551:2014 «Швелери. Сортамент» https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63430.
5. ДСТУ 7549:2014. «Швелери сталеві гарячекатані з відігнутою полицею для вагонеток. Сортамент». https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63430.
6. ДСТУ 8808:2018 «Профілі сталеві гнуті. Технічні умови» <https://uscc.ua/dstu-88082018-profil-stalevi-gnuti-tehnicni-umovi>
7. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка. В 6 т. Т. 5. / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев. – Днепропетровск: Днепро-ВАЛ, 2002. – 482 с. <https://vdoc.pub/documents/5-4on3iio3uk20>.
8. Григоренко В.У., Заболотний О.М. (2024). Складові розвитку методів калібрування валків для прокатки швелерів на основі зменшення нерівномірності деформування». Вісник приазовського державного технічного університету вип. 48. 2024 р. с. 73-82 <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024>
9. Григоренко В.У., Заболотний О.М. (2024). Стосовно підвищення експлуатаційних властивостей швелерів вироблених способом згинання із смуги або штрипса. Проблеми і перспективи розвитку сучасних технологій в контексті відбудови і сталого розвитку України - 2024 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Дніпро, 28-29 листопада 2024 р) : Навчально-науковий інститут сучасних технологій / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро: ДВНЗ«ПДТУ», 2024. – 99 с., с.39-40. https://drive.google.com/file/d/1_4lmPQFfJ6Ya2G93905EL60NMdiCCVEv/view

Hrygorenko V.U., Zabolotnii O.M.

INCREASING THE RIGIDITY AND STRENGTH AND ENSURING THE WELDING OF COLD-BENT CHANNELS

Channels are produced using hot rolling technologies from square or rectangular billets and using cold bending technology of sheet strip.

Low-carbon steels used in the production of hot-rolled channels allow welding, but do not have high strength. Therefore, the question arises of increasing the strength of the metal of the channels.

Steel channels are bent in places between the flange and the uprights. But such a profile is inferior in rigidity when compared to hot-rolled channels. Therefore, the question arises of increasing the rigidity of channels manufactured by the bending method.

The work proposes components of the developed technology for manufacturing cold-bent profiles. The first component is the use of low-carbon steel of controlled rolling where intensive heat treatment is performed, which mainly increases the strength of the steel. The second component - to increase the rigidity in the last passes on continuous profile bending mills, it is proposed to locally heat the metal in the corner zones and precipitate the shelf and fill the 90-degree angle between the shelf and the rack.

Bent channels are made of low-carbon steels (steel 20, St3sp,) with tensile strengths of 370-410 N/mm² regulated by DSTU 2834-94. The production of bent channels is carried out, for example, from S355 steel where the tensile strength reaches 630 N/mm² according to EN 10025-2:2022. At the same time, the reduction in the mass of a linear meter of the channel compared to hot-rolled can reach significant values. It is significant that channels made of S355 steel can be welded.

Keywords: hot-rolled and cold-bent channels, stiffness, strength, weldability, steels from controlled rolling, local heating, local deformation, reduction in the mass of a linear meter of channel.

Стаття надійшла 12.05.2025р.

УДК 669.162.22

doi.org/10.31498/2522-9990292025330258

Щербаков С. В., Черевко О. О.

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОРГАНІЗАЦІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИКЛАДАННЯ ПРАКТИЧНИХ ДИСЦИПЛІН

В статті зроблено акцент на необхідності трансформування змісту та методів викладання дисциплін вищої школи в зв'язку з викликами сучасності, пов'язаними з відсутністю можливостей організації очного навчання, коли освітні послуги надаються безпосередньо за місцем проживання чи тимчасового перебування. За таких умов самотійна робота з опанування матеріалів навчальних дисциплін стає на передній план та складає суттєвий відсоток від загального учбового навантаження. Слід означити основні ключові моменти переходу на дистанційну форму навчання. Особливої уваги потребує формування у студентів алгоритмів планування учбового процесу. В той же час і робота викладача потребує зміни методів подання інформації в бік більшої конкретики, практичності та орієнтації на аудиторію. З цього приводу мають бути переглянуті методичні матеріали з метою адаптації до більш самотійної роботи. Оцінка знань має максимально позбутися формальних підходів. Демонстрація та захист практичних робіт повинні бути публічними з залучанням всієї аудиторії студентів. Це сприяє підвищенню рівня активності та засвоєння матеріалів лекцій, зменшенню кількості нез'ясованих питань та помилок під час виконання завдань. Дуже важливими є міждисциплінарні зв'язки, тому що дистанційна форма освіти за відсутності матеріально-технічної бази потребує надання більш комплексних знань, особливо в області моделювання поведінки об'єктів та роботи спеціалізованого обладнання.

Отже, в даній роботі розглянуто можливості впровадження сучасних інформаційних технологій для організації практичної роботи студентів в умовах дистанційного навчання з обмеженим доступом до лабораторної бази. В якості прикладу представлено віртуальну лабораторну роботу з проектування локальної системи автоматичного регулювання з використанням програмованого логічного контролера (PLC). Наведено принципи математичного моделювання об'єкта та організації дистанційного управління засобами SCADA та web-технологій.

Ключові слова: дистанційне навчання, технічні дисципліни, методи викладання, інформатизація, самотійна робота, практичний досвід, віртуальний лабораторний практикум.

Постановка проблеми. У зв'язку з виникненням необхідності, яка може бути продиктована різними життєвими обставинами, наприклад, обмежені фізичні можливості,

підвищена зайнятість, віддаленість від місця навчання та неможливість постійної присутності в місті розташування вищого навчального закладу тощо, дистанційне навчання стає особливо актуальним. Тому сучасний період інформатизації освіти потребує вдосконалення технологій викладання дисциплін, особливо технічних, в умовах обмеженого використання лабораторної бази, коли створюються суттєві проблеми в отриманні практичних навичок, передбачених програмою курсу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі дослідження проблем викладання технічних дисциплін в умовах дистанційної форми навчання як джерела були використані роботи, присвячені методичним проблемам визначення, побудови та використання відповідних засобів навчання як зарубіжних так і вітчизняних дослідників: А.К. Noor, Т.М. Wasfy, Кухаренко В. М. [1, 6], Нестеренко С. А. [2], Камінська, П. А. [3], Гуревич Р. С. [5] та ін. Основні труднощі, з якими зіткнулися навчальні заклади, пов'язані з відсутністю технічної інфраструктури та засобів, необхідних для організації дистанційного навчання; складнощами адаптації до онлайн-викладання педагогічного персоналу; обмеженнями дистанційного навчання в певних галузях. Вимушений перехід на дистанційне викладання дисциплін створює нові продуктивні можливості, серед яких слід назвати опанування та випробування нових інструментів та засобів, що забезпечують дистанційний навчальний процес, більшу гнучкість навчання, зростання інновацій у навчальному процесі, розширення можливостей викладання та навчання на відстані та отримання механізму доступу до функціональних можливостей навчання в дистанційному форматі.

Мета дослідження. Запропонувати та продемонструвати можливості дистанційного викладання технічних дисциплін в галузі промислової автоматизації на прикладі досвіду створення та проведення лабораторного практикуму з програмування промислових контролерів (PLC).

Основний матеріал дослідження. ДВНЗ «ПДТУ» наразі має статус тимчасово переміщеного навчального закладу. За таких умов виникають певні об'єктивні проблеми в викладанні дисциплін, які мають практичну складову. В основному – це обмеженість або відсутність лабораторної бази.

Кафедра автоматизації і комп'ютерних технологій займається підготовкою фахівців у відповідній галузі. Задачі автоматизації технологічних процесів складаються з багатьох етапів. Однією з перших та головних задач, що вирішують студенти, є експериментальне дослідження об'єктів для подальшого проектування автоматизованих систем та їх налаштування з метою забезпечення оптимальних якісних характеристик роботи.

Враховуючи дистанційний характер викладання та навчання студентів, наявність та доступність лабораторної бази є дуже важливим фактором, що дає можливість не тільки отримувати теоретичні знання, а й застосовувати їх на практиці.

Одним із простих та доступних рішень поставленої практичної задачі є використання програмних засобів симуляції роботи обладнання та математичних моделей об'єктів. Так, при створенні віртуального лабораторного практикуму відсутність можливості роботи з реальним технологічним обладнанням у вигляді промислового контролера було доволі успішно компенсовано застосуванням безкоштовного програмного симулятора контролера S7-200 (рис. 1). Дане програмне забезпечення обрано виходячи з умов доступності та простоти використання. Не зважаючи на спрощену архітектуру контролера, студенти отримують базові принципи програмування з використанням мови Step 7, яка використовується для програмування сучасної лінійки контролерів фірми Siemens.

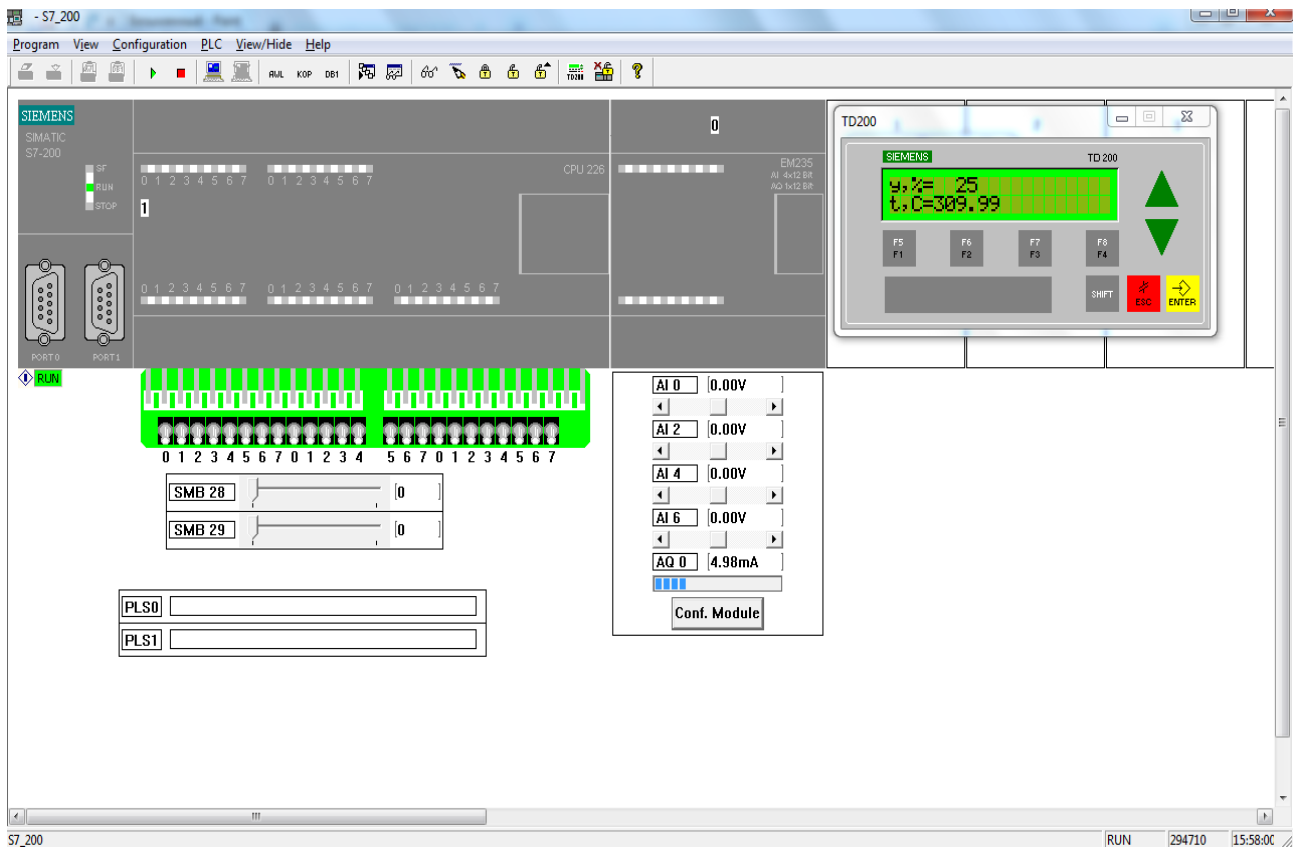


Рисунок 1 – Програмний симулятор контролера

Об'єкт автоматизації може реалізовуватися за допомогою математичної моделі або бути реальним. В залежності від цього необхідні параметри розраховуються числено в PLC, або отримуються безпосередньо від датчиків технологічної інформації. Оскільки в зв'язку з відсутністю лабораторного стенду немає можливості керувати реальним об'єктом, створено його математичну модель. Основою моделі є рівняння перехідного процесу (кривої розгону) статичного об'єкту управління. Коефіцієнти рівняння знаходяться шляхом обробки масиву даних, отриманих під час проведення експерименту. Таке моделювання обумовлене необхідністю побудови замкнутої системи регулювання зі зворотнім зв'язком у вигляді поточного значення фізичного параметру, що регулюється. Саме цей параметр розраховується моделлю в реальному часі безпосередньо в контролері з використанням штатних засобів програмування мови Step 7 та вбудованих математичних функцій. Також програмно реалізовано алгоритм роботи регулятора відповідно до обраного закону регулювання. Налаштування регулятора відповідають обраному типу перехідного процесу та можуть бути отримані в результаті розрахунку чи шляхом адаптації під час роботи системи автоматичного регулювання. Всі ці задачі вирішуються студентами при виконанні відповідних лабораторних робіт в курсі «Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації».

Дистанційне управління стає практично можливим завдяки наявності web-сервера та HMI-інтерфейсу, що відображає технологічний процес (рис. 2). Засобами SCADA WinCC під час виконання відповідних лабораторних робіт створено інтерфейс віртуального лабораторного стенду. Елементами інтерфейсу є органи керування системою управління та тренди технологічних параметрів. Система може працювати як у ручному, так і в автоматичному режимі. З використанням локальних мереж або Internet студенти можуть бути залученими до безпосереднього керування процесом в онлайн режимі. Програмні технології зв'язку OPC (OLE for Process Control) надають можливість підключення та вирішення задач управління реальним технологічним обладнанням за наявності відповідних умов.

Використання інформаційних технологій дозволяє створювати нові сучасні моделі навчання, що дає можливість лишатись в тренді науково-технічного прогресу, збагачує та урізноманітнює процес викладання.

У період інформатизації навчання та впровадження вимушеного дистанційного формату для успішної та ефективної професійної діяльності викладач зобов'язаний використовувати всі можливості дистанційної освіти. У зв'язку з розвитком дистанційних освітніх технологій та їх активним використанням з'явилася можливість побудови індивідуальних освітніх траєкторій відповідно до сучасних запитів.

Впровадження в освіту технологій дистанційного навчання сприяє одержанню якісно нового освітнього продукту з новими можливостями. Інформатизація з використанням сучасних технологій, як інструменти, надають нові перспективні можливості для викладання в умовах проблем і викликів сьогодення.

Вирішення комплексу задач, поставлених під час створення практичного курсу, представленого в даній роботі, забезпечує отримання студентами необхідних компетенцій. Зокрема, розглянуті технічні рішення реалізації подібних віртуальних лабораторій створюють

можливість ефективного залучення студентів до опанування практичної складової навчального процесу в дистанційному режимі.

Список використаних джерел

1. Кухаренко В. М., Бондаренко В. В. Екстрене дистанційне навчання в Україні: монографія. Харків: Вид-во КП «Міська друкарня», 2020. 409 с.
2. Нестеренко С. А. Проблеми організації дистанційної освіти. Удосконалення освітньовиховного процесу в закладі вищої освіти: збірник науковометодичних праць. Мелітополь: ТДАТУ, 2022. С. 8-16.
3. Камінська, П. А., Новіков, Ю. Л., Томашевський, В. М. Огляд сучасного стану систем дистанційного навчання. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили. Серія: Комп'ютерні технології. 2011. Т. 160. Вип. 148. С. 146-157.
4. Биков В. Ю. Моделі організаційних систем відкритої освіти: монографія. К.: Атіка, 2008. 250 с.
5. Гуревич Р. С. Інформаційно-телекомунікаційні технології в навчальному процесі та наукових дослідженнях: навчальний посібник для студентів педагогічних ВНЗ і слухачів інститутів післядипломної педагогічної освіти. К.: Освіта України, 2006. 366 с.
6. Кухаренко В. М. Дистанційне навчання: Умови застосування. Дистанційний курс: навч. посіб.: 3-тє вид. Х.: НТУ «ХП», Торсінг, 2002. 320 с.
7. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації. Програмування систем автоматизації з використанням мікроконтролерів Siemens серії Simatic S7-200: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації» для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання / уклад. С. В. Щербakov. – Маріуполь : ПДТУ, 2018. – 54 с.
8. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації: методичні вказівки з самостійного вивчення курсу «Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації» для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної та заочної форм навчання / уклад. С. В. Щербakov. – Маріуполь : ПДТУ, 2019. – 27 с.

Shcherbakov S., Cherevko O.

COMPUTER TECHNOLOGIES IN THE ORGANIZATION OF DISTANCE TEACHING OF PRACTICAL DISCIPLINES

The article emphasizes the need to transform the content and methods of teaching higher education disciplines in connection with the challenges of modernity associated with the lack of opportunities for organizing full-time education, when educational services are provided directly at the place of residence or temporary stay. Under such conditions, independent work on mastering the materials of educational disciplines comes to the fore and constitutes a significant percentage of the total educational load. The main key points of the transition to a distance learning form should be identified. Special attention should be paid to the formation of learning planning algorithms among students. At the same time, the work of the teacher requires changing the methods of presenting information towards greater specificity, practicality and audience orientation. In this regard, methodological materials should be revised in order to adapt to more independent work. Knowledge assessment should be as free from formal approaches as possible. Demonstration and defense of

practical work should be public with the involvement of the entire student audience. This contributes to increasing the level of activity and assimilation of lecture materials, reducing the number of unclear questions and errors during the performance of tasks. Interdisciplinary connections are very important, because the remote form of work in the absence of material and technical base requires more complex knowledge, especially in the field of modeling the behavior of objects and the operation of specialized equipment.

So, this work considers the possibilities of implementing modern information technologies for organizing practical work of students in conditions of distance learning with limited access to the laboratory base. As an example, virtual laboratory work on the design of a local automatic control system based on a programmable logic controller (PLC) is presented. The principle of implementing a control object using mathematical modeling and organizing remote control using SCADA and web technologies is given.

Keywords: *distance learning, technical disciplines, teaching methods, informatization, independent work, practical experience, virtual laboratory practicum.*

Стаття надійшла 05.05.2025р.

УДК 671.774.35

doi.org/10.31498/2522-9990292025330259

Григоренко В.У., Куцевол С.В.

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВЕДУЧИХ ШЕСТЕРЕНЬ З ЗМІННИМ ДІЛІЛЬНИМ РАДІУСОМ ДЛЯ СТАНІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ

Стани холодної прокатки труб широко застосовуються для виробництва високоякісних труб відповідального призначення.

В існуючих станах холодної прокатки труб примусовий катаючий радіус є незмінним і рівним ділільному діаметру ведучої шестерні пари ведуча шестерня - нерухома зубчаста рейка, а природний катаючий радіус є змінним і залежить від параметрів робочого конусу деформування.

Значення примусового катаючого радіусу приймають на практиці як середню величину між діаметром труби-заготовки та діаметром готової труби і тільки в одному перетині робочого конусу значення примусового катаючого радіусу буде дорівнювати значенню природного катаючого радіусу.

В роботі розглядається варіант застосування ведучих шестерень з змінним ділільним радіусом для кожного наступного зуба шестерні за законом відповідно з зміною природного катаючого радіусу.

Вперше запропоновано алгоритм розрахунків ділільного радіусу кожного зубця ведучої шестерні який забезпечує рівність примусового та природного катаючого радіусів по довжині зони деформування робочого конуса згідно його параметрів для способу коли деформування стінки виконують на конічній оправці і коли деформування стінки виконують на оправці з криволінійною твірною її повздожнього профілю.

Отримані результати потрібні для забезпечення більш раціональних умов деформування металу, покращення поверхні прокатаних труб, зменшення зносу поверхні рівчаків валків та оправок, а також для підвищення міжремонтного часу роботи обладнання стану.

Також це потрібно і для проектування при розробці модернізацій чи при розробці нових конструкцій станів холодної прокатки труб.

Ключові слова: стани холодної прокатки труб, природний та примусовий катаючий радіуси, змінний ділильний радіус ведучої шестерні. алгоритм розрахунків.

Постановка проблеми. Стани холодної прокатки труб широко застосовуються для виробництва труб відповідального призначення [1]. Технологія холодного пластичного деформування труб пільгерною прокаткою забезпечує необхідну високу якість параметрів труб.

Радіус точки на рівчаку валка, де швидкість виходу металу з калібру дорівнює коловій швидкості точки рівчака валка називають природним катаючим радіусом. Природний катаючий радіус знаходиться між вершиною рівчака валка та циліндричною поверхнею валка.

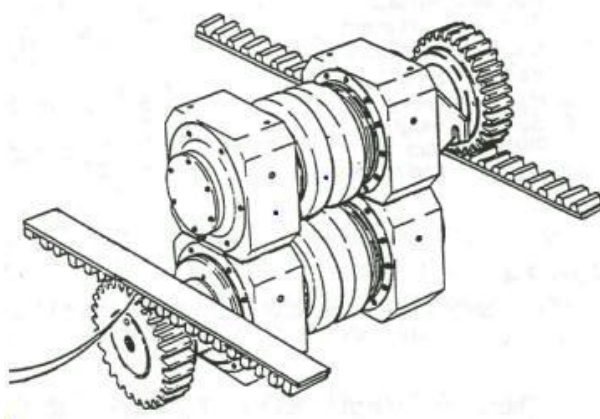


Рисунок 1 – Схема приводу ведуча шестерня та нерухома рейка на сучасних станах холодної прокатки труб [2]

Природний катаючий радіус можна визначати з достатньою точністю за спрощеною формулою

$$R_{npk} = R_o - 0,76R_i$$

де, R_o - ідеальний радіус бочки валка, що дорівнює половині діаметра бочки валка плюс половина зазору між валками при прокатці;

R_i - радіус круглого перерізу робочого конусу в положенні i кліті, що є змінним по довжині робочого конусу.

Природний катаючий радіус є величиною змінною.

При упорі зубця ведучої шестерні у зубець шестеренчастої рейки валок перекатується і поверхнею рівчака деформує трубу на нерухомій оправці.

Примусовий катаючий радіус при цьому дорівнює радіусу ділильного кола ведучої шестерні і є незмінним по довжині ходу кліті.

Значення примусового катаючого радіусу приймають на практиці як середню величину між діаметром труби-заготовки та діаметром готової труби. Вибирають ведучу шестерню з ділильним діаметром близьким значенню примусового катаючого радіусу. При цьому, тільки в одному перетині робочого конусу значення примусового катаючого радіусу буде дорівнювати значенню природного катаючого радіусу. В інших перетинах кінематичні умови деформування

будуть відрізнятися від природних і здійснювати додатковий вплив на процес прокатки та на обладнання.

Потрібно шукати можливості для максимального наближення значень примусового катаючого радіусу до значень природного у всіх перетинах робочого конусу деформування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зараз в Україні і в світі для виробництва холоднодеформованих труб застосовують стани типу КРВ, LG, ХПТ [3]. На цих станах примусовий катаючий є незмінним по довжині ходу кліті. Це приводить до додаткових навантажень на інструмент та обладнання стану, ускладнює процес деформування і приводить до збільшених витрат.

Відомі наступні пропозиції по зміні конструкцій стану стосовно приближення примусового катаючого радіусу природному у всіх перетинах робочого конусу:

- застосування рейок під кутом до лінії прокатки;
- переміщення зубчастої рейки під час прокатки;
- застосування пари зубчасте колесо та рейка з перемінним шагом зубців;
- застосування ексцентричних шестерень в парі з незмінною рейкою;
- застосування некруглих зубчастих коліс з перемінним ділільним радіусом [4].

Але ці пропозиції на сьогодні не знайшли застосування.

В роботі авторів [5] представлено основні положення з розвинутого методу визначення змінних параметрів зубчастої пари шестерня - рейка станів холодної прокатки труб для забезпечення природного процесу прокатки. Новизна є наступному - значення радіусу ділільного кола на кожному зубці змінюється по залежності в відповідності до зміни катаючого природного радіусу.

Але в цій роботі не було представлено методу визначення ділільного радіусу для кожного зубця ведучої шестерні в залежності від параметрів процесу деформування по довжині зони обтиску робочого конусу деформації.

Мета дослідження. Метою статті є зв'язати визначення ділільного радіусу кожного зубця ведучої шестерні відповідно з значеннями природного катаючого радіусу по довжині зони обтиску робочого конуса деформування.

Це необхідно в основному для забезпечення більш раціональних умов деформування металу, покращення поверхні прокатаних труб, зменшення зносу поверхні ривчаків валків та оправок, а також для підвищення міжремонтного часу роботи обладнання стану.

Також це потрібно і для проектування при розробці модернізацій чи при розробці нових конструкцій станів холодної прокатки труб.

Основний матеріал дослідження. Одним з варіантів зменшення різниці між примусовим та природним катаючими (R_{npk}) радіусами є застосування шестерень з змінним ділільним радіусом для кожного наступного зуба шестерні за законом відповідно з зміною природного катаючого радіусу по довжині зони обтиску робочого конусу розкатки (рис.2).

При розрахунках параметрів процесу деформування в стані холодної прокатки природний катаючий радіус R_{npk} в залежності від параметрів зони обтиску стінки робочого конусу деформування можна визначити як :

$$R_{npk} = D_o/2 - (d_{oi}/2 + S_i) \quad (1)$$

де, D_o - ідеальний діаметр валка, що дорівнює діаметру бочки валка плюс зазор між валками;

d_{oi} - діаметр оправки в перетині i ;

S_i - товщина стінки в перетині i

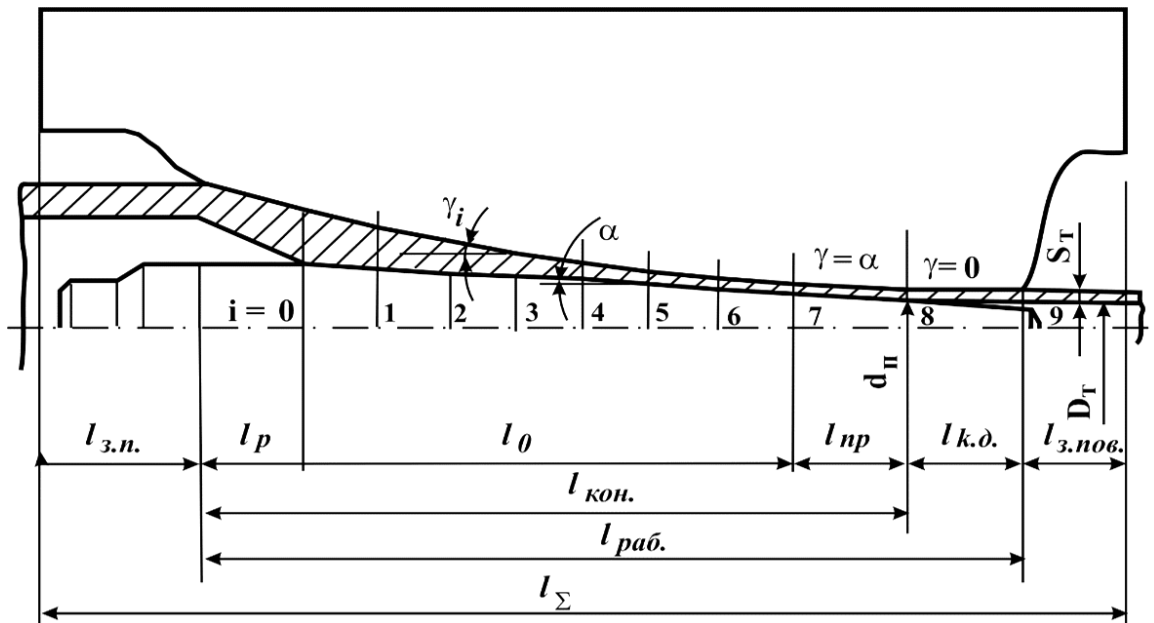


Рисунок 2 – Робочий конус прокатки в процесі холодної пільгерної прокатки труб: $l_{з.п.}$ – довжина ділянки зеву подачі; l_p – довжина ділянки редукування; l_o – довжина ділянки обтиснення стінки; l_{np} – довжина ділянки калібрування стінки; $l_{к.д.}$ – довжина ділянки калібрування діаметра; $l_{з.пов.}$ – довжина зеву повороту труби; $l_{кон.}$ – довжина кінчної частини оправки; $l_{раб.}$ – довжина робочої частини конуса розкатки; l_{Σ} – довжина розгортки рівчака [6]

Розповсюджені два способи холодної прокатки труб. Перший, коли деформування стінки виконують на кінчній оправці. Другий, коли деформування стінки виконують на оправці з криволінійною твірною її повздовжнього профілю.

Для першого способу.

Конусність оправки приймається в залежності від прийнятого маршруту прокатки.

Залежність для визначення товщини стінки S_i в перетині i описується формулою [6]:

$$S_i = \frac{S_0}{\frac{\mu_s - 1}{1 - e^{-n}} \left(1 - e^{-n \frac{x}{l_o}} \right) + 1}, \quad (2)$$

де, S_0 – товщина стінки з урахуванням стовщення при редукуванні;

l_o та x – довжина зони обтиснення та координата перерізу i , відповідно, мм;

μ_s – відношення товщини стінки заготовки до товщини стінки готової труби;

n – коефіцієнт.

Для другого способу.

Застосовують в основному два типи калібровок валків та оправок [6].

Для калібровок першого типу. Вираховують діаметри калібру D_i і діаметр оправки d_i в перетинах зони деформування робочого конусу. По різниці D_i та d_i визначають значення товщини стінки в відповідному перетині i .

Розподіл діаметрів D_i в перетинах рівчака калібру по контрольних перерізах визначають за формулою:

$$D_i = D_T + (D_3 - D_T - \gamma_{\min} \cdot l) \left(\frac{x}{l} \right)^{n+1} + \gamma_{\min} x, \quad (3)$$

де $\gamma_{\min}$ – мінімальна конусність рівчака в кінці конуса деформації;
 x – координата перерізу;
 l – загальна довжина зони обтиснення;
 n – показник ступеня, що визначає крутизну нахилу профілю рівчака.

За аналогічною формулою знаходяться діаметри оправки в контрольних перерізах [4]:

$$d_i = d_T + (d_u - d_T - \gamma_{\min} \cdot l) \left(\frac{x}{l} \right)^{n+1} + \gamma_{\min} x, \quad (4)$$

де $\alpha_{\min}$ – мінімальна конусність оправки в кінці конуса деформації;
 d_u – діаметр циліндричної частини оправки.

Для калібровки другого типу. Діаметр калібру в контрольних перерізах:

$$D_{xK} = D_F + (D_L - D_F - Z - l_i) \left(\frac{x}{l} \right)^E + Z \frac{x}{l}, \quad (5)$$

де D_{xK} – діаметр калібру в місці «х» робочого конуса;
 D_L – зовнішній діаметр труби-заготовки;
 D_F – зовнішній діаметр готової труби;
 Z – бажана мінімальна конусність оправки перед перетиском;
 l_i – зазор між внутрішнім діаметром труби-заготовки та оправки;
 x/l – відносна координата перерізу x ;
 E – коефіцієнт крутизни профілю.

Діаметр оправки у контрольних перерізах:

$$D_{xD} = d_F + (d_L - d_F - z - l_i) \left(\frac{x}{l} \right)^{E_1} + Z \frac{x}{l}, \quad (6)$$

де D_{xD} – діаметр оправки в місці «х»;
 d_L – внутрішній діаметр чорнової труби;
 d_F – внутрішній діаметр готової труби;
 Z – бажана мінімальна конусність;
 E_1 – коефіцієнт крутизни профілю оправок

Програмний продукт який можна використати для розрахунків представлений в джерелі [7].

ВИСНОВКИ

Застосування представленого алгоритму вираховування значень ділильного радіусу ведучих шестерень забезпечить рівність примусового катаючого радіус природному катаючому радіусу.

Це забезпечить природні умові холодної продольної прокатки в калібрах і підніме технічний і технологічний рівень обладнання. а також і технології холодної прокатки труб. Покращаться умовив деформування металу.

Це приведе до кращою поверхні прокатаних труб, зменшення зносу поверхні ривчаків валків та оправок, а також для підвищення міжремонтного часу роботи обладнання стану. Також це потрібно і для проектування при розробці модернізацій чи при розробці нових конструкцій станів холодної прокатки труб.

Список використаних джерел

1. McNair, S., Chaharsooghi, A.S., Carnevale, M., Onnela, A., Daugin, J., Cichy, K., ..., Lunt, A. J.G. (2022). Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(3-4), pp.667-681. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07982-8>
2. Azizoğlu, Y.; Sjöberg, B.; Lindgren, L.-E (2024). Modeling of Cold Pilgering of Stainless-Steel Tubes. *J. Manuf. Process.* 2024, 112, 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.039>
3. Golovchenko O., Grigorenko V., & V. Protsiv V. (2023). Microstructures and mechanical properties of cold rolled pipes with increased small deformation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 054-059. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/054>.
4. Пат. 61108410 Японія, МКИ В21 В 21/00. Пілігримовий стан холодної прокатки труб / Сумітомо кіндзоку кочо (Японія); Масами О., Масахиро К., Мунэкацу К. (Японія). – Опубл. 27.05.86.
5. Григоренко В.У., Куцевол С.В. (2024) розвитку методу визначення змінних параметрів зубчатої пари шестерня - рейка станів холодної прокатки труб для забезпечення природного процесу прокатки. *ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Наука та виробництво.* № 28 (2024). С 12-18. <https://orcid.org/0000-0002-1809-2842>.
6. Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П. (2010). Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пільгерної прокатки труб і калібровки інструмента: монографія. *Дніпропетровськ: Пороги.* 120 с.
7. Григоренко В.У., Клименко П.Л., Ханін М.І. (2000). Розрахунки калібровки та зусиль в станах холодної прокатки труб з використанням ЕВМ: [Учб. посібник] - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2000. – 22 с

Hryhorenko V.U., Kutsevol S.V.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF DRIVE GEARS WITH VARIABLE PITCH RADIUS FOR COLD ROLLING PIPE ROLLING MITTS

Cold rolling pipe mills are widely used for the production of high-quality pipes for critical purposes.

In existing cold rolling pipe mills, the forced rolling radius is constant and equal to the pitch diameter of the drive gear of the drive gear - fixed gear rack pair, and the natural rolling radius is variable and depends on the parameters of the working deformation cone.

The value of the forced rolling radius is taken in practice as the average value between the diameter of the blank pipe and the diameter of the finished pipe, and only in one section of the working cone will the value of the forced rolling radius be equal to the value of the natural rolling radius.

The paper considers the option of using drive gears with a variable pitch radius for each subsequent gear tooth according to the law in accordance with the change in the natural rolling radius.

For the first time, an algorithm for calculating the pitch radius of each tooth of the drive gear is proposed, which ensures the equality of the forced and natural rolling radii along the length of the deformation zone of the working cone according to its parameters for the method when the wall deformation is performed on a conical mandrel and when the wall deformation is performed on a mandrel with a curvilinear generator of its longitudinal profile.

The obtained results are needed to ensure more rational conditions for metal deformation, improve the surface of rolled pipes, reduce wear of the surface of the grooves of rolls and mandrels, as well as to increase the time between overhauls of the mill equipment.

It is also needed for design when developing modernizations or when developing new designs for cold pipe rolling mills.

Keywords: cold pipe rolling mills, natural and forced rolling radial, algorithm for calculating the pitch radius of the driving shaft.

Стаття надійшла 30.04.2025р.

УДК 671.774.35

doi.org/10.31498/2522-9990292025330261

Григоренко В.У., Іскрижицький Д.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСЕРЕДКУ ХОЛОДНОГО ПІЛЬГЕРНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ТРУБИ ПРИ ЗВОРОТНОМУ ХОДІ КЛІТІ

В Україні виробляють значні обсяги холоднодеформованих труб відповідального призначення.

В останнє півтора десятиліття почався процес заміни станів холодної прокатки труб застарілих конструкцій на новітні стани типу КРВ, ЛГ, ХПТ.

Особливістю новітніх станів ХПТ 6-20, ХПТ 2-40, ХПТ 20 -45, КРВ25, ЛГ20 є те, що вони мають можливість виконувати процес за різними варіантами сполучень подачі та повороту і в тому числі за варіантом з подачею та поворотом перед деформування як прямим так і зворотним ходом кліті. При цьому процес деформування зворотним ходом є мало вивченим.

Такі стани встановлені для забезпечення можливості випускати труби за регламентованими показниками по якості за сучасними стандартами та з високою продуктивністю і відповідно для підвищення конкурентної здатності українських виробників.

В роботі набуло розвитку дослідження осередку деформування труби між нерухомою оправкою та валками, що перекачуються при зворотному ході кліті і висвітлюються позитивні відмінності від процесу деформування при прямому ході кліті.

Отримані результати потрібні для проектування маршрутів прокатки, вибору варіантів застосування сполучень подачі та повороту при прямому та зворотному ході кліті, розробок калібровок інструменту процесу холодного деформування на новітніх станах холодної прокатки труб відповідального призначення з підвищеними якісними показниками.

Ключові слова: *новітні стани холодної прокатки труб, сполучення подачі та повороту, деформування при прямому та при зворотному ході кліті, миттєвий осередок деформації, контакт металу з валком, контакт металу з оправкою.*

Постановка проблеми. Україна є державою де виробляють значні обсяги холоднодеформованих труб. Наприклад, один з заводів виробляє до дев'ятнадцяти процентів світового виробництва труб з корозійностійких сталей.

Процесам холодної пільгерної деформації на станах холодної прокатки труб приділяють значну увагу дослідники. Це пояснюється тим, що холоднодеформовані труби застосовують в виробі де по ним транспортують рідини під тиском [1].

В останнє півтора десятиліття почався процес заміни станів ХПТ застарілих конструкцій на стани новітніх конструкцій. Це стани типу ХПТ, КРВ, ЛГ [2]. Наприклад, стан КРВ-25LC має наступні основні технічні характеристики: - зовнішній діаметр прокатних труб в мм 8–30, - товщина стінки прокатних труб в мм 0,5–4,5; - значення швидкості подвійних ходів за хвилину від 15 до 320; значення величини подачі в мм 0–8.

Важливою особливістю новітніх імпортованих станів холодної прокатки труб типів ХПТ 6-20, ХПТ 20-45, КРВ25, ЛГ20, що працюють на українських виробництвах є можливість виконувати процес за різними варіантами режимів подачі та повороту, наприклад, [2, 3]:

Варіант 1 – подача виконується перед деформуванням прямим рухом, а поворот виконується перед деформуванням зворотним рухом кліті.

Варіант 2 – подача виконується перед деформуванням прямим рухом, а поворот виконується перед деформуванням прямим та перед деформуванням зворотним рухами кліті.

Варіант 3 – подача труби здійснюється перед деформуванням прямим і зворотним ходом кліті, а поворот – перед деформуванням зворотним ходом кліті;.

Варіант 4 – подача та поворот виконуються перед деформуванням прямим ходом кліті, а також перед деформуванням зворотним рухом кліті.

Значні переваги щодо точності труб при рівній продуктивності стану має варіант прокатки де подача та поворот виконуються перед деформування рухом кліті вперед та назад.

Процес деформування при зворотному ході кліті є мало вивченим і потребує додаткових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Осередок деформування при прямому ході кліті представлено на рис.1 [4]. При прямому ході задній торець труби заготовки закріплено в патроні подачі та повороту.

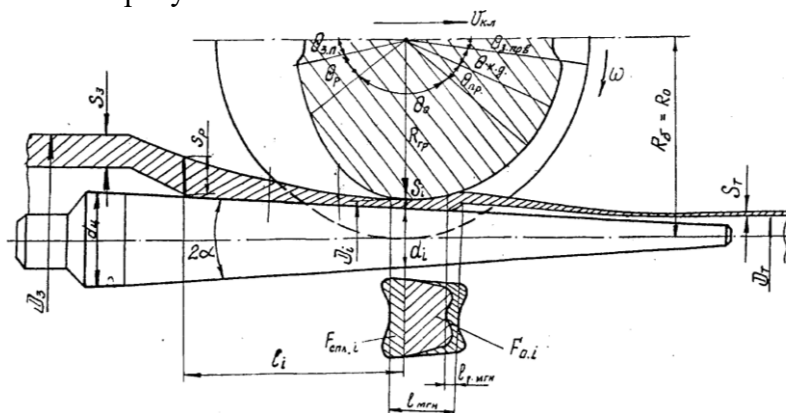


Рисунок 1 – Схема робочого конусу деформування та миттєвого осередку деформації при деформуванні прямим ходом кліті [4]: $\theta_{з.п.}$ - зев подачі; θ_p - ділянка редукування; θ_o - обтискна ділянка; $\theta_{пр.}$ - передоздоблювальна ділянка; $\theta_{к.д.}$ - ділянка калібрування діаметра;

$\theta_{з.пов}$ - зев повороту; $Dз$ - діаметр заготовки; $dц$ - діаметр циліндричної частини оправки; $Sз$ - товщина стінки заготовки; $Sр$ - товщина стінки в кінці зони редукування; 2α - два кута конусності оправки; Di - діаметр робочого конусу у положенні i ; Si - товщина стінки у положенні i ; $Rгp$ - радіус гребня рівчака валка; di - діаметр оправки в положенні i ; $Rб$ - радіус ідеального діаметра валка; Sm - товщина стінки прокатої труби; Dt - діаметр прокатої труби; Fo,i - горизонтальна проекція поверхні осередка деформації; $Fзпл.i$ - величина збільшення Fo з-за плющення валка в положенні i ; $Lмгн$ - довжина миттєвого осередка деформування; Li - довжина від початку зони обтиснення до точки місця положення миттєвого осередка деформації; $Lр.мгн$ - довжина зони редукування в миттєвому осередку деформування

При деформуванні прямим ходом кліті труби-заготовки відбувається лінійний зсув переднього торця труби разом з деформованою частиною труби, що знаходиться після початку миттєвого осередка деформування.

Для деформування зворотним ходом кліті схема робочого конусу деформування та миттєвого осередку деформації має відмінності. Таким чином потрібні дослідження з процесу деформування зворотним ходом кліті.

Мета дослідження. Метою статті є представлення досліджень і розробок з процесу деформування в миттєвому осередку деформування металу між валками, що перекачуються та нерухомою оправкою при зворотному ході кліті. Це обумовлено тим, що в новітніх станах холодної пільгерної прокатки є можливість виконання деформування труби-заготовки при зворотному ході кліті, і цей процес ще є не достатньо вивченим.

Результати дослідження потрібні при розробках технологій прокатки на новітніх станах холодного пільгерного деформування труб.

Основний матеріал дослідження. Для дослідження розробили схему процесу прокатки зворотним ходом кліті, де показано частину сумарного осередку деформування та миттєвий осередок деформації (рис. 2).

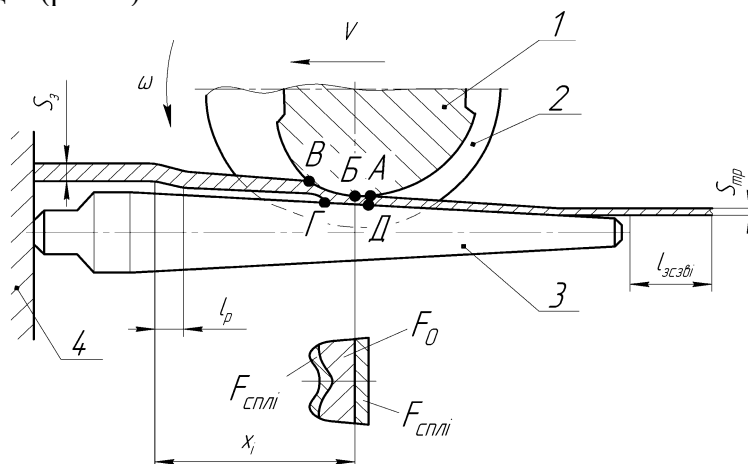


Рисунок 2 – Схема сумарного та миттєвого осередку деформації при деформуванні труби - заготовки зворотним ходом кліті: 1- валок; 2 - рівчак валка; 3 - нерухома оправка; $Sз$ - товщина стінки труби-заготовки; Smp - товщина стінки прокатої труби; АБВГД- миттєвий осередок деформації; V - поступова швидкість валка; ω - кутова швидкість валка; $lзсзві$ - лінійний зсув переднього торця труби; lp - довжина зони редукування; Fo - горизонтальна проекція площі контакту рівчака валка з трубою, що деформується; $Fсплі$ - площа збільшеної частини площі контакту рівчака з трубою за рахунок сплюснення валка; Xi - довжина від початку деформованої труби-заготовки до положення валка і

Розроблена схема процесу прокатки зворотним ходом кліті дала можливість аналізу схем робочого конусу деформування та миттєвого осередку деформації при деформуванні прямим ходом кліті (рис.1) і при деформування зворотним ходом кліті (рис. 2).

Основними особливостями є наступне: - при зворотному ході напрямлення обертання валків протилежне по зрівнянню з процесом деформування прямим ходом; - форма горизонтальної проекції осередку деформування при деформуванні зворотним ходом кліті подібна процесу деформування прямим ходом, але протилежно направлена; - метал при зворотному ході кліті має лінійний зсув в сторону протилежну поступової швидкості центру валка, тоді як при прямому ході напрямки лінійного зсуву та поступової швидкості центру валків однакові; - при деформуванні зворотним ходом кліті метал не має змоги зсуватися в напрямку поступової швидкості центра валка так як труба затиснута у патроні подачі та повороту який є нерухомим під час деформування, тоді як при деформуванні прямим ходом це відбувається.

При прямому ході кліті (рис. 3) за рахунок деформації металу труби, що знаходиться між валками та оправкою частина труби, що знаходиться в миттєвому осередку деформації і за осередком пересувається в напрямку прямого ходу кліті.

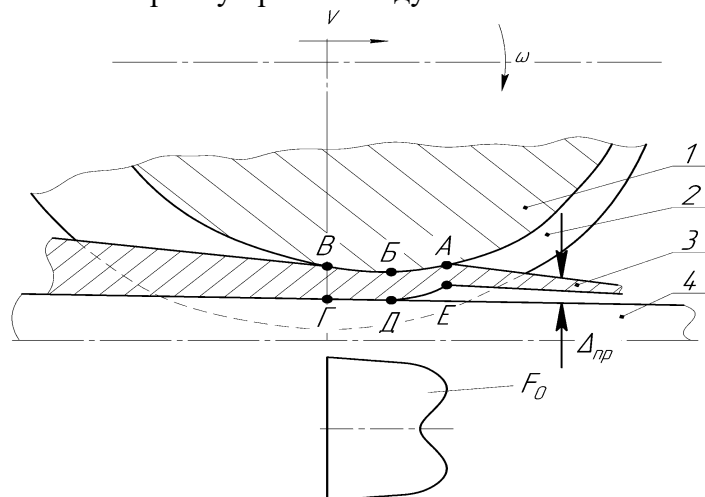


Рисунок 3 – Миттєвий осередок металу при холодному пільгерному деформуванні труби заготовки в готову трубу прямим ходом кліті : - 1 –валок; - 2 – рівчак валка; - 3 – труба; - 4 оправка; АБВГДЕ- миттєвий осередок деформування; - F_0 горизонтальна проекція поверхні контакту рівчака валка з трубою без сплюгнення валків, Δ - зазор між внутрішньою поверхнею труби та оправкою, що з'являється після подачі труби - заготовки

Це називають лінійним зсувом. При деформуванні прямим ходом кліті напрямлення обертання валків протилежне по зрівнянню з процесу деформування зворотним ходом (рис. 3);

При деформуванні зворотним ходом кліті (рис. 4) метал не має змоги зсуватися в напрямку поступової швидкості центра валка, так як задній торець труби є затиснутим в патроні подачі.

Металургія

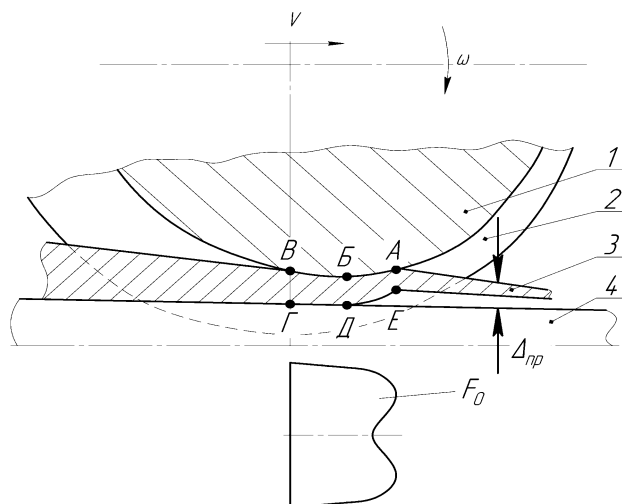


Рисунок 4 – Миттєвий осередок металу при холодному пільгерному деформуванні труби зворотним ходом кліті: - 1 – валок; - 2 – рівчак валка; - 3 – труба; - 4 оправка; АБВГДЕ - миттєвий осередок деформування; - F_0 горизонтальна проекція поверхні контакту рівчака валка з трубою без сплюснення валків, - зазор між внутрішньою поверхнею труби та оправкою, що з'являється після подачі труби - заготовки .

При зворотному ході по зрівнянню з процесом деформування прямим ходом направлення обертання валків протилежне; форма горизонтальної проекції осередку деформування подібна процесу деформування прямим ходом, але протилежно направлена; метал при зворотному ході кліті має лінійний зсув в сторону протилежну поступової швидкості центра валка; метал не має змоги зсуватися в напрямку поступової швидкості центра валка.

Слід зазначити, що при деформуванні зворотним ходом умови деформування в миттєвому осередку деформації на контакті металу з нерухомою оправкою такі, що стиснення металу в миттєвому осередку деформування є більш інтенсивним ніж при прямому. На це вказують також дослідження де показано, що при прокатці при застосуванні додаткової подачі при зворотному ході кліті зерно подрібнюється в більшій мірі [5]

ВИСНОВКИ

В останнє півтора десятиліття в Україні встановлені новітні стани ХПТ 6-20, ХПТ 2-40, ХПТ 20 -45, КРВ25, LG20. Особливість таких станів є в тому, що вони мають можливість виконувати процес за різними варіантами режимів подачі та повороту. Найбільший інтерес представляє процес з подачею та поворотом перед деформування як прямим так і зворотним ходом кліті. Але процес деформування зворотним ходом є мало вивченим.

В роботі набуло розвитку дослідження осередку деформування труби в миттєвому осередку деформування між нерухомою оправкою та валками, що перекачуються при зворотному ході кліті і висвітлюються відмінності від процесу деформування при прямому ході кліті.

Отримані результати дослідження можуть бути корисними для технологів виробництв холоднодеформованих труб при проектуванні маршрутів прокатки, виборі варіантів застосування сполучень подачі та повороту при прямому та зворотному ході кліті, розробок калібровок інструменту процесу холодного деформування на новітніх станах холодної прокатки труб відповідального призначення з підвищеними якісними показниками.

Список використаних джерел

1. McNair, S., Chaharsooghi, A.S., Carnevale, M., Onnela, A., Daugin, J., Cichy, K., ..., & Lunt, A. J.G. (2022). Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(3-4), pp.667-681. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07982-8>.
2. Golovchenko O., Grigorenko V., & V. Protsiv V. (2023). Microstructures and mechanical properties of cold rolled pipes with increased small deformation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 054-059. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/054>.
3. Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П. (2010). Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пильгерної прокатки труб і калібровки інструмента: монографія. Дніпропетровськ: Пороги. 120 с.
4. Григоренко В.У., Іскрижицький Д.В. (2024). Складові методу визначення раціонального кінематичного режиму в осередку пластичного деформування металу у холодної прокатці труб валками. Міжвузівський тематичний збірник наукових праць. Наука та виробництво №28, 2024. ПДТУ. С. 6-12. doi.org/10.31498/2522-9990282024318309.
5. Golovchenko O., Grigorenko V., V. Protsiv V. (2023). Microstructures and mechanical properties of cold rolled pipes with increased small deformation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 054-059. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/054>

Hrygorenko V.U., Iskrizhytskyi D.V.

RESEARCH OF THE COLD PIPE ROLLING CENTER DURING THE CAGE'S REVERSE MOVEMENT

Ukraine produces significant volumes of cold-formed pipes for critical purposes.

In the last decade and a half, the process of replacing old-fashioned cold-rolling pipe mills with modern KPW, LG, and KPT mills has begun.

A feature of the modern KPT 6-20, KPT 2-40, KPT 20-45, KPW25, and LG20 mills is that they have the ability to perform the process in various feed and rotation modes, including the option of feed and rotation before deformation in both direct and reverse motion of the stand. At the same time, the process of deformation in reverse motion is poorly studied.

Such mills are installed to ensure the ability to produce pipes according to regulated quality indicators according to modern standards and sufficient productivity and, accordingly, to ensure the competitiveness of Ukrainian manufacturers.

The work has developed a study of the deformation center of the pipe between the stationary mandrel and the rolls that roll during the reverse movement of the stand and indicates the differences from the deformation process during the forward movement of the stand.

The results obtained are necessary for the design of rolling routes, the selection of options for using feed and rotation combinations during the forward and reverse movement of the stand, the development of calibrations of the cold deformation process tool on the latest cold rolling mills for critical purposes with increased quality indicators.

Keywords: latest cold rolling mills for pipes, feed and rotation combinations, instantaneous deformation center, metal-roll contact, metal-mandrel contact.

Стаття надійшла 12.05.2025р.

УТОЧНЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДКРИТИХ ТОНКОСТІННИХ ПОПЕРЕЧНИХ ПЕРЕРІЗІВ

У статті розглянуто питання уточнення геометричних характеристик відкритих тонкостінних поперечних перерізів сталевих балок при дії ексцентрично прикладеного навантаження, що призводить до виникнення кручення. Тримальні елементи при цьому перебувають в умовах складної просторової роботи каркасної системи. Приділено увагу необхідності врахування реальних конструктивних особливостей перерізів, що впливають на розподіл напружень та деформацій у процесі експлуатації. Досліджено вплив заокруглень у місці примикання полицки до стінки прокатних відкритих профілів, що призводить до істотного підвищення моменту інерції при вільному крученні.

Запропоновано уточнений підхід до визначення секторального моменту інерції, що враховує не лише геометричні параметри перерізу, але й жорсткісні характеристики приєднаних конструктивних елементів. Це дозволяє точніше моделювати умови роботи балки у складі просторової системи, зокрема при її жорсткому розкріпленні з площини вигину. Уточнення вказаних характеристик дозволяє уникнути суттєвих похибок при визначенні нормальних напружень у перерізі, що в свою чергу впливає на загальну просторову стійкість та експлуатаційну надійність конструкції.

Застосування уточнених характеристик дозволяє забезпечити рівномірний розподіл напружень, раціональніше використання міцності матеріалу та уникнення локальних перевантажень, що є критично важливим для тонкостінних елементів. Урахування зазначених факторів сприяє підвищенню точності розрахунків, зниженню матеріалоємності конструкцій, покращенню техніко-економічних показників і забезпеченню довговічності проєктованих об'єктів. До розрахунків, у яких використовуються ці геометричні характеристики, можна віднести звичайний розрахунок балок на загальну стійкість і альтернативний розрахунок за теорією другого порядку; розрахунок на сумісну дію поперечного вигину (в одній або двох площинах) і кручення від ексцентричності прикладення навантаження; розрахунок балок із пошкодженнями та викривленнями.

Ключові слова: геометричні характеристики, відкриті перерізи, вигин, кручення.

Постановка проблеми. Геометричні характеристики, що потребують уточнення, пов'язані з крученням балок незамкненого профілю. До них належать: момент інерції при вільному крученні, секторальний момент інерції, пружна згинально-крутильна характеристика перерізу, секторальна координата (площа), координата центра вигину, параметр моносиметричності (коефіцієнт Вагнера), параметр стійкості (допоміжна відстань перерізу при моносиметричності). Припустимо, що при розкріпленні профіля в якості центра вигину виступає перемінна точка, що проходить через вісь обертання перерізу і може переміщатися вгору або вниз залежно від ступеня розкріплення, тобто її положення залежить від жорсткості та місця розміщення приєднаних конструкцій. При достатній зсувній жорсткості приєднаних конструкцій вважається, що стиснутий пояс повністю закріплений від поперечних зміщень і вісь обертання, котру в цьому випадку називають зв'язаною, проходить по верху балки. Зсувна жорсткість бокових в'язей часто досягає достатнього значення для прийняття зв'язаної осі обертання балки.

Для перерізів, які складаються з кількох вузьких прямокутників із певною довжиною і товщиною, момент інерції при вільному крученні визначається за формулою Сен-Венана і

залежить від розмірів прямокутників. Але окрім розбиття на дві повні полицки та стінку, поперечний переріз швелера можна розкласти і на повну стінку, висота якої дорівнює висоті перерізу, та неповні полицки, що примикають до стінки. Якщо товщина полицки більша за товщину стінки, перший спосіб дає дещо вищий результат обчислення моменту інерції. Але є й інший метод розбиття перерізу на прямокутники, який призводить до усередненого результату, – по серединній лінії. Він виглядає найбільш обґрунтованим з точки зору теорії про кручення тонкостінних стрижнів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] визначено ступінь впливу заокруглення між стінкою та полицкою на емпіричний коефіцієнт η , що характеризує тип і складність поперечного перерізу. Цей коефіцієнт спрощено враховує наявність заокруглень між прямокутниками, на які розбитий поперечний переріз. Так момент інерції двотаврового перерізу при вільному крученні I_t за нормами проектування сталевих конструкцій визначається з урахуванням сталого множника $\eta = 1,29$, для швелерного перерізу прийнято $\eta = 1,11$. У праці [2] зібрано до таблиць результати визначення моменту інерції при вільному крученні для вибраних балочних двотаврів з паралельними гранями полиць (по ГОСТ 26020-83) і швелерів з ухилом полиць (по ГОСТ 8240-89). Виявлено, що для прокатних профілів, особливо з відносно великим радіусом заокруглень, ступінь наближеності визначення моменту інерції при вільному крученні може бути значним. Більш точна оцінка корекції моменту інерції для відрахувань на відкритих кінцях і його посилення на стику є виправданою і може виконуватись у програмі LTBeamN, яка показала найкращу збіжність з методом скінченних елементів, або за методикою вписаного кола, наведеною, наприклад, в роботі [3]. Значення перехідного коефіцієнта η для прокатних нормальних двотаврів, виходячи з найбільш подібних результатів у таблиці, коливається суттєво – в межах від 1,23 до 1,60 (для швелерів – від 1,05 до 1,13) і потребує аналітичного диференційованого опису. Найбільший ефект досягається для двотаврів середньої висоти (35Б1 – 45Б1) і високих швелерів (22 – 40). Наведені в [3] формули рекомендується використовувати для отримання моменту інерції I_t з урахуванням заокруглень.

У книзі [4] детально розглядаються методи визначення пружної та пластичної несучої здатності поперечних перерізів, включаючи вплив геометричних особливостей, таких як заокруглення в місцях з'єднання елементів профілю. У публікації [5] розглянуто кілька методик визначення геометричних характеристик, які закладені у спеціальну програму LTBeamN з вільним доступом, для загального випадка – моносиметричний двотавровий переріз із заокругленнями між стінкою і полицками. У статті [6] представлено іншу комп'ютерну програму для точного визначення геометричних характеристик тонкостінних балок із відкритими та замкненими поперечними перерізами. Програма враховує депланацію і топологічну структуру перерізу за допомогою теорії графів, що дозволяє отримувати надійні результати при аналізі складних багатокамерних конструкцій. Автори статті [7] окреслили ефективний скінченноелементний підхід для аналізу кручення балок з постійним поперечним перерізом, який також враховує депланацію перерізу. Запропонований елемент дозволяє підвищити точність розрахунків напружено-деформованого стану, особливо для тонкостінних балок із відкритими та замкненими перерізами, і демонструє переваги перед традиційними методами при складних умовах навантаження.

Мета дослідження. Удосконалення методики визначення крутильних і секторальних характеристик відкритих тонкостінних поперечних перерізів сталевих балок може бути проведене шляхом уточнення геометричних параметрів, зокрема заокруглень у місцях з'єднання елементів профілю, а також врахування впливу жорсткості приєднаних конструкцій. Це дозволить точніше оцінювати внутрішні зусилля, включаючи згинально-крутильний бімомент і згинальні моменти у двох площинах, і, як наслідок, забезпечити достовірну оцінку напружено-деформованого стану елементів у складі просторових систем.

Основний матеріал дослідження. Відповідно до [5] загальна площа вказаного на рис. 1 поперечного перерізу дорівнюватиме сумі площ елементів, що входять до його складу, а саме верхнього поясу ($f1$), нижнього поясу ($f2$), стінки (w), верхнього ($r1$) і нижнього заокруглень ($r2$), величини яких встановлюються за правилами знаходження площ елементарних геометричних фігур:

$$A = A_{f1} + A_{f2} + A_w + 2A_{r1} + 2A_{r2}. \quad (1)$$

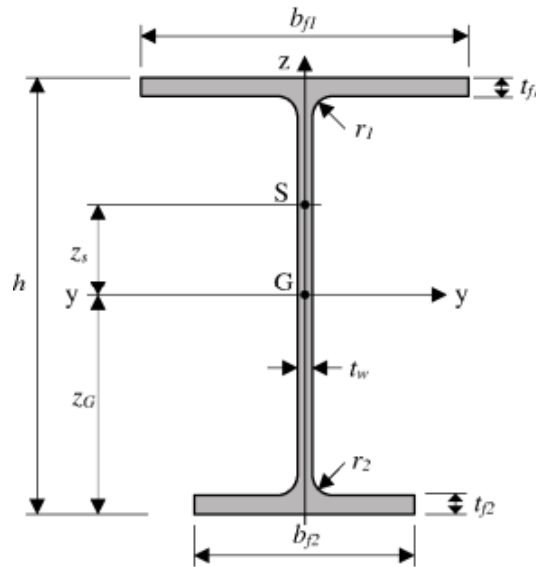


Рисунок 1 – Моносиметричний двотавровий переріз із заокругленнями між стінкою і полічками

В такому випадку ордината центра ваги (центроїда) G відносно низу перерізу дорівнюватиме:

$$z_G = \frac{1}{A} \left[A_{f1} \left(h - \frac{t_{f1}}{2} \right) + A_{f2} \frac{t_{f2}}{2} + A_w \left(t_{f2} + \frac{h_w}{2} \right) + 2A_{r1} \left(h - t_{f1} - v_{r1} \right) + 2A_{r2} \left(t_{f2} + v_{r2} \right) \right]. \quad (2)$$

Допоміжні відстані для верхнього і нижнього поясів, стінки, верхнього і нижнього заокруглень відповідно до рис. 1 становитимуть:

$$z_{f1} = h - \frac{t_{f1}}{2} - z_G; \quad z_{f2} = \frac{t_{f2}}{2} - z_G; \quad (3)$$

$$z_w = t_{f2} - \frac{h_w}{2} - z_G; \quad (4)$$

$$z_{r1} = h - t_{f1} - v_{r1} - z_G; \quad z_{r2} = t_{f2} + v_{r2} - z_G. \quad (5)$$

Моменти інерції поперечного перерізу дорівнюватимуть у такому разі:

$$I_y = I_{yf1} + I_{yf2} + I_{yw} + 2I_{r1} + 2I_{r2} + A_{f1}z_{f1}^2 + A_{f2}z_{f2}^2 + A_wz_w^2 + 2A_{r1}z_{r1}^2 + 2A_{r2}z_{r2}^2$$

$$I_z = I_{zf1} + I_{zf2} + I_{zw} + 2I_{r1} + 2I_{r2} + 2A_{r1} \left[\frac{t_w}{2} + v_{r1} \right]^2 + 2A_{r2} \left[\frac{t_w}{2} + v_{r2} \right]^2. \quad (6)$$

Для визначення моменту інерції при вільному крученні прямокутного поперечного перерізу розмірами $a \times b$, причому $a < b$, використаємо наближену формулу, використовуючи правило знаходження геометричних характеристик вищого порядку:

Ремонт та відновлення деталей машин

$$R_t(a, b) = \frac{1}{3} b a^3 \left[1 - \frac{a}{b} \left(0,633 - 0,055 \frac{a^3}{b^3} \right) \right]. \quad (7)$$

Тоді складові моменту інерції при вільному крученні для окремих прямокутних елементів становитимуть:

$$I_{t1} = R_t(t_{f1}, b_{f1}); \quad I_{t2} = R_t(t_{f2}, b_{f2}); \quad I_{t3} = R_t(t_w, h); \quad (8)$$

$$I_{t4} = R_t(\min(t_w, t_{f1}), \max(t_w, t_{f1})); \quad I_{t5} = R_t(\min(t_w, t_{f2}), \max(t_w, t_{f2})); \quad (9)$$

$$I_{t6} = R_t(\min(t_w + 0,4r_1, t_{f1} + 0,4r_1), \max(t_w + 0,4r_1, t_{f1} + 0,4r_1)); \quad (10)$$

$$I_{t7} = R_t(\min(t_w + 0,4r_2, t_{f2} + 0,4r_2), \max(t_w + 0,4r_2, t_{f2} + 0,4r_2)). \quad (11)$$

Загальний (сумарний) момент інерції поперечного перерізу сталевго елемнту при вільному крученні дорівнюватиме:

$$I_t = I_{t1} + I_{t2} + I_{t3} - \left(\frac{t_w}{b_{f1}} \right)^2 I_{t4} - \left(\frac{t_w}{b_{f2}} \right)^2 I_{t5} + \alpha_1 (I_{t6} - I_{t4}) + \alpha_2 (I_{t7} - I_{t5}). \quad (12)$$

Допоміжні коефіцієнти α при $i = 1; 2$ становитимуть для $r_i > 0$ (для $r_i = 0$ $\alpha_i = 0$):

$$\text{при } 6t_w + t_{fi} \leq b_{fi} \rightarrow \alpha_i = 4; \quad \text{при } 6t_w + t_{fi} > b_{fi} \rightarrow \alpha_i = \frac{8}{1 + \frac{6t_w + t_{fi}}{b_{fi}}}. \quad (13)$$

Розглянемо альтернативний підхід до визначення моменту інерції при вільному крученні із врахуванням заокруглень. Записавши формулу для перерізу з двома полицками та однією стінкою без заокруглень між ними, ми отримаємо:

$$I_t = [2bt_f^3 + (h - 2t_f)t_w^3] / 3. \quad (14)$$

У ДБН В.2.6-198:2014 [8] заокруглення враховується введенням емпіричного коефіцієнта ε без пояснень його призначення. Для прокатного двотавра, переріз якого розбивається на прямокутники досить однозначно (дві повні полицки та стінка), формула запишеться так

$$I_t = \varepsilon [2bt_f^3 + (h - 2t_f)t_w^3], \quad (15)$$

де ε – коефіцієнт, що приймається за таблицею К.1 ДБН В.2.6-198:2014 [8]; для прокатного двотавра він дорівнює $\varepsilon = 0,43$ (1,29/3), для прокатного швелера $\varepsilon = 0,37$ (1,11/3).

Аналогічна формула для швелера записується у такому вигляді (формула (К.5) ДБН В.2.6-198:2014 [8]):

$$I_t = 0,37(h t_w^3 + 2bt_f^3). \quad (16)$$

Така форма запису позбавлена змісту, оскільки при врахуванні повної висоти перерізу h і повної ширини перерізу b кут між полицкою і стінкою береться двічі.

Окрім розбиття на дві повні полицки та стінку, переріз швелера можна розкласти і на повну стінку, висота якої дорівнює висоті перерізу, та неповні полицки, що примикають до стінки. Якщо товщина полицки більша за товщину стінки, перший спосіб дає дещо вищий результат обчислення моменту інерції. Але є й інший метод розбиття перерізу на прямокутники, який призводить до усередненого результату, – по серединній лінії. Він виглядає найбільш обґрунтованим з точки зору теорії про кручення тонкостінних стрижнів. Для швелера без урахування заокруглень в такому випадку запишемо:

$$I_t = [2b_s t_f^3 + h_s t_w^3] / 3. \quad (17)$$

Ремонт та відновлення деталей машин

Розглянемо альтернативний підхід до визначення моменту інерції при вільному крученні з урахуванням заокруглень. Методика, наведена нижче, була отримана на основі довідника [3]. Підвищення значення моменту інерції за рахунок заокруглень виконується за наступною схемою. D є діаметром найбільшого кола, яке може бути вписане на стику, а α є безрозмірним коефіцієнтом, отриманим за графіком або емпіричною формулою. Існують різні графіки і формули для різних перерізів. Відрахування на кожному вільному кінці становить $0,105t_f^4$. Коли є чотири кінці, як у двотавра, то необхідно робити чотири відрахування. Коли є тільки два кінці, як у швелера, то проводяться два відрахування (вище наведене посилання помилково показує чотири відрахування для швелерів).

Діаметр вписаного кола для двотавра (для Т-подібного з'єднання) задається за наступною формулою:

$$D_1 = \frac{(t_f + r)^2 + (r + 0,25t_w)t_w}{2r + t_f}. \quad (18)$$

Уточнювальний безрозмірний емпіричний коефіцієнт α_1 визначається за формулою:

$$\alpha_1 = -0,042 + 0,2204 \frac{t_w}{t_f} + 0,1355 \frac{r}{t_f} - 0,0865 \frac{rt_w}{t_f^2} - 0,0725 \frac{t_w^2}{t_f^2}. \quad (19)$$

Із поданими уточнювальними підвищувальними коефіцієнтами D_1 і α_1 , а також з урахуванням заниження на кінцях полицок, формула для визначення моменту інерції при вільному крученні набуде наступного вигляду:

$$I_t = \frac{2}{3}bt_f^3 + \frac{1}{3}(h - 2t_f)t_w^3 + 2\alpha_1 D_1^4 - 0,420t_f^4. \quad (20)$$

Діаметр вписаного кола для швелера (для L-подібного з'єднання) задається за наступною формулою:

$$D_3 = 2 \left\{ (3r + t_w + t_f) - \sqrt{2(2r + t_w)(2r + t_f)} \right\}. \quad (21)$$

Уточнювальний безрозмірний емпіричний коефіцієнт α_3 :

$$\alpha_3 = -0,0908 + 0,2621 \frac{t_w}{t_f} + 0,1231 \frac{r}{t_f} - 0,0752 \frac{rt_w}{t_f^2} - 0,0945 \frac{t_w^2}{t_f^2}. \quad (22)$$

Із поданими уточнювальними підвищувальними коефіцієнтами D_3 і α_3 , а також з урахуванням заниження на кінцях полицок, формула для визначення моменту інерції при вільному крученні для швелера набуде наступного вигляду:

$$I_t = \frac{2}{3}bt_f^3 + \frac{1}{3}(h - 2t_f)t_w^3 + 2\alpha_3 D_3^4 - 0,210t_f^4. \quad (23)$$

Уточнені формули для визначення секторального моменту інерції перерізу з ухилом полиць можна знайти в посібнику [3].

Внаслідок достатньо малого впливу заокруглень між стінкою і полицками на значення секторального моменту інерції перерізу, що встановлено в [4], у випадку моносиметричного двотаврового перерізу формула для його знаходження відносно центра вигину має спрощений вигляд:

Ремонт та відновлення деталей машин

$$I_{\omega} = I_{zf1} \left[1 - \frac{I_{zf1}}{I_z} \right] \left[h - \frac{t_{f1}}{2} - \frac{t_{f2}}{2} \right]^2; \quad (I_{zf1} \neq 0). \quad (24)$$

Секторальний момент інерції перерізу для частково розкріпленої двотаврової балки при довільній зсувній жорсткості S приєднаних конструкцій відносно точки обертання пропонується визначати за підібраною формулою, яка практично повністю відповідає результатам чисельних розрахунків (для прокатної балки співвідношення моментів інерції нижнього і верхнього поясу $\frac{I_{zf2}}{I_{zf1}} = 1$):

$$I_{\omega,D} = I_{\omega} \left(1 + \left(\frac{S}{S_a} \right)^2 \frac{I_{zf2}}{I_{zf1}} \right); \quad (I_{zf1} \neq 0); \quad (S \leq S_a), \quad (25)$$

де S_a – зсувна жорсткість приєднаних конструкцій, потрібна для прийняття зв'язаної осі обертання.

Для знаходження секторального моменту інерції швелерного перерізу доцільно використовувати формулу, але за умови, що ширина та висота перерізу беруться по серединній лінії

$$I_{\omega} = \frac{t_f b_s^3 h_s^2}{12} \cdot \frac{3 + 2\eta\psi}{6 + \eta\psi}, \quad (26)$$

де $\eta = h_s / b_s$; $\psi = t_w / t_f$ – співвідношення розмірів перерізу (рис. 2).

Для двотавра максимальна секторальна координата поперечного перерізу $\omega_{\max}$ (рис. 2) може бути спрощено визначена за формулою:

$$\omega_{\max} = 0,25 b_f h_s, \quad (27)$$

де b_f – ширина полицки;

h_s – відстань між центрами полицок.

Для моносиметричного двотавра секторальні координати поперечного перерізу ω_1 і ω_2 без розкріплення, а також координати $\omega_{1,D}$ і $\omega_{2,D}$ (рис. 2) відносно точки, яка розташована на осі обертання при розкріпленні, визначаються за формулами:

$$\omega_1 = 0,5 b_{f1} e_1; \quad \omega_2 = 0,5 b_{f2} e_2; \quad (28)$$

$$\omega_{1,D} = 0,5 b_{f1} e_{1,D}, \quad \omega_{2,D} = 0,5 b_{f2} e_{2,D}, \quad (29)$$

де b_{f1} – ширина верхньої полицки;

b_{f2} – ширина нижньої полицки;

e_1 – відстань від центра вигину до центра верхньої полицки;

e_2 – відстань від центра вигину до центра нижньої полицки;

$e_{1,D}$ – відстань від точки обертання до центра верхньої полицки;

$e_{2,D}$ – відстань від точки обертання до центра нижньої полицки.

Ремонт та відновлення деталей машин

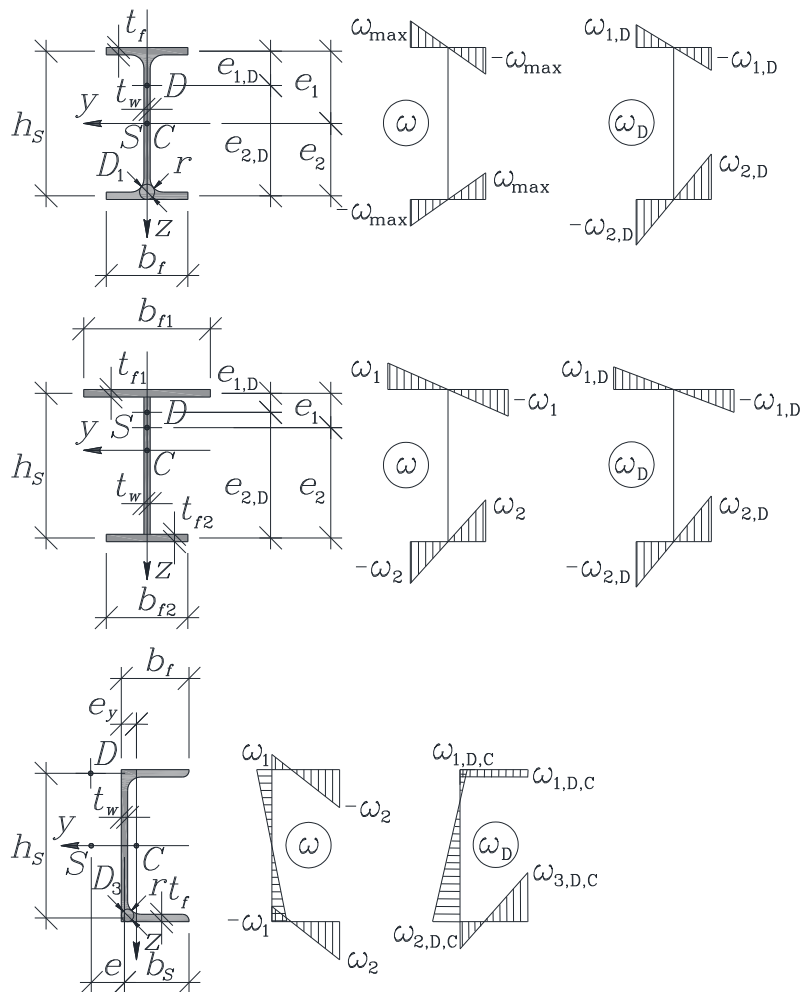


Рисунок 2 – Епюри секторальних координат перерізу для прокатних і складених балок без розкріплення і з розкріпленням

Положення осі обертання відносно центра вигину при довільній зсувній жорсткості S приєднаних конструкцій встановлюється, виходячи з міркувань, що відстань між ними при нульовій жорсткості дорівнює нулю, а при досягненні потрібної жорсткості S_a зв'язана вісь обертання балки проходить через центр верхньої полицки, де відбувається примикання бокової опори. Тоді відстані e_1 і e_2 (для прокатної балки $e_1 = e_2 = 0,5h_s$), а також відстані $e_{1,D}$ і $e_{2,D}$ становитимуть:

$$e_1 = \frac{I_{zf2}}{I_z} h_s; \quad e_2 = \frac{I_{zf1}}{I_z} h_s; \quad (30)$$

$$e_{1,D} = e_1 - \frac{S}{S_a} e_1; \quad e_{2,D} = e_2 + \frac{S}{S_a} e_1. \quad (31)$$

Для швелера секторальні координати поперечного перерізу ω_1 і ω_2 (рис. 2) без урахування розкріплення та координати $\omega_{1,D,C}$, $\omega_{2,D,C}$ і $\omega_{3,D,C}$ (вони складаються з власних координат $\omega_{1,D}$, $\omega_{2,D}$ і $\omega_{3,D}$ відносно точки обертання D та координати точки обертання D відносно центра ваги C ($\omega_{D,C}$) у випадку наявності зв'язаної осі обертання, котра проходить над центром вигину, спрощено визначаються за формулами:

Ремонт та відновлення деталей машин

$$\omega_1 = 0,5h_s e; \quad \omega_2 = 0,5h_s (b_s - e); \quad (32)$$

$$\omega_{1,D,C} = \omega_{1,D} + \omega_{D,C} = 0,5h_s (e - e_y + 0,5t_w); \quad (33)$$

$$\omega_{2,D,C} = \omega_{2,D} + \omega_{D,C} = -h_s e + 0,5h_s (e - e_y + 0,5t_w), \quad (34)$$

$$\omega_{3,D,C} = \omega_{3,D} + \omega_{D,C} = -h_s e + h_s b_s + 0,5h_s (e - e_y + 0,5t_w), \quad (35)$$

де e – відстань від центра вигину до центра стінки;

b_s – ширина полицки від вільного кінця до центра стінки;

e_y – відстань по осі y від центра ваги C до лівої грані стінки (таблична величина).

Відстань від центра вигину до центра стінки логічно визначати за правилами опору матеріалів визначення геометричних характеристик

$$e = b_s / \left(2 + \frac{h_s t_w}{3b_s t_f} \right). \quad (36)$$

Тоді секторальний момент інерції перерізу для розкріпленої швелерної балки при достатній зсувній жорсткості $S \geq S_a$ приєднаних конструкцій відносно точки обертання пропонується визначати за виведеною формулою, яка практично повністю відповідає результатам чисельних розрахунків:

$$I_{\omega,D} = b_s t_f \omega_{1,D,C}^2 + \frac{1}{3} h_s t_w (\omega_{1,D,C}^2 + \omega_{1,D,C} \omega_{2,D,C} + \omega_{2,D,C}^2) + \frac{1}{3} b_s t_f (\omega_{2,D,C}^2 + \omega_{2,D,C} \omega_{3,D,C} + \omega_{3,D,C}^2). \quad (37)$$

Ордината центра вигину S відносно центра ваги (центроїда) G дорівнюватиме:

$$z_S = \frac{1}{I_z} [I_{zf1} z_{f1} + I_{zf2} z_{f2} + I_w z_w + 2I_{r1} z_{r1} + 2I_{r2} z_{r2}]. \quad (38)$$

Коефіцієнт Вагнера для вертикальної асиметрії становитиме:

$$\beta_z = \frac{1}{2I_y} \left[z_{f1} (I_{zf1} + A_{f1} z_{f1}^2 + 3I_{yf1}) + z_{f2} (I_{zf2} + A_{f2} z_{f2}^2 + 3I_{yf2}) + \right. \\ \left. z_w (I_{zw} + A_w z_w^2 + 3I_{yw}) + 2z_{r1} (4I_{r1} + A_{r1} z_{r1}^2) + 2z_{r2} (4I_{r2} + A_{r2} z_{r2}^2) \right] - z_S. \quad (39)$$

Параметр моносиметричності дорівнює:

$$z_j = -\beta_z. \quad (40)$$

Параметр стійкості (допоміжна відстань перерізу при моносиметричності) без урахування заокруглення:

$$r_y = \frac{1}{I_y} \left[z_S I_{zf1} + A_{f1} e^3 - A_{f2} (h_s - e)^3 + \frac{t_w}{4} (e^4 - (h_s - e)^4) \right], \quad (41)$$

$$\text{де } e = h_w + t_{f2} + \frac{t_{f1}}{2} - z_G; \quad h_s = h_w + \frac{t_{f1}}{2} + \frac{t_{f2}}{2}.$$

Ремонт та відновлення деталей машин

Параметр моносиметричності без урахування заокруглення становитиме:

$$z_j = z_s - \frac{r_y}{2}. \quad (42)$$

Коефіцієнт Вагнера для вертикальної асиметрії та параметр моносиметричності (від'ємний коефіцієнт Вагнера) можна достатньо точно встановити з урахуванням заокруглення (програма LTBeamN) або без урахування заокруглення (наприклад, програма ConSteel) через окремий параметр стійкості та ординату центра вигину відносно центра ваги.

ВИСНОВКИ

Урахування жорсткості приєднаних конструкцій при визначенні крутильних геометричних характеристик перерізу балки точніше відображає дійсну роботу балки у складі тримальних систем. Урахування заокруглень у місці примикання полочки до стінки дозволяє в прокатних профілях суттєво збільшити значення моменту інерції при вільному крученні. Зазначені фактори характеризують особливості роботи сталевих елементів при складному опорі, дозволяють точніше визначити значення внутрішніх зусиль, які впливають на загальний напружено-деформований стан конструкції та визначають розрахункові співвідношення. Секторальні геометричні характеристики при жорсткому розкріпленні профіля пропонується визначати відносно точки примикання бокової опори, яка розташована на осі обертання балки. Внаслідок високої збіжності результатів розрахунку і моделювання виявлено, що для швелера з достатньою жорсткістю настилу вісь обертання розташовуватиметься над центром вигину на рівні верхньої полочки.

Список використаних джерел

1. *Villette M.* Calcul approche de l'inertie de torsion d'une section en I ou en T // *Construction métallique*. – 2011. – Vol. 48, № 2. – P. 15–24.
2. *Hudz S.A., Gasii G.M., Pents V.F.* The Problem of Consideration Torsion Emergence in Beams // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – Vol. 7, № 3.2. – P. 141–148.
3. *Tata Steel.* Steel building design: design data. – The Steel Construction Institute and The British Constructional Steelwork Association Limited, 2013. – 690 p.
4. *Kindmann R., Frickel J.* Elastische und plastische Querschnittstragfähigkeit. Grundlagen, Methoden, Berechnungsverfahren, Beispiele. – Online-Auflage. – 2017. – 616 s.
5. *Gale'a Y.* Elastic critical lateral torsional buckling moment of beams – Presentation of LTBeam (in French) // *Revue Construction Métallique*. – 2003. – № 2. – P. 47–76.
6. *Prokić A.* Computer program for determination of geometrical properties of thin-walled beams with open–closed section // *Computers & Structures*. – 2000. – Vol. 74, № 6. – P. 705–715.
7. *Murín J., Kutíš V.* An effective finite element for torsion of constant cross-sections including warping with secondary torsion moment deformation effect // *Engineering Structures*. – 2008. – Vol. 30, № 10. – P. 2716–2723.
8. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування / Остаточна редакція. Видання офіційне. – К. : Мінрегіонбуд України, 2014. – 199 с.

Hudz S.A., Godun T.M., Dariienko V.V.

REFINEMENT OF GEOMETRICAL PROPERTIES OF OPEN THIN-WALLED CROSS-SECTIONS

The paper deals with the issue of refinement of geometrical properties of open thin-walled cross-sections of steel beams under the action of an eccentrically applied load, which leads to torsion. In this case, the supporting elements are in conditions of complex spatial operation of the frame system. Attention is paid to the need to take into account the real structural features of the cross-sections that affect the distribution of stresses and strains during operation. The influence of rounding at the junction of the flange to the web of rolled open profiles, which leads to a significant increase in the torsion constant, is investigated.

A refined approach to the determination of the warping constant is proposed, which takes into account not only the geometric parameters of the cross-section but also the stiffness characteristics of the attached structural elements. This makes it possible to more accurately model the operating conditions of a beam as part of a spatial system, in particular, when it is rigidly detached from the bending plane. The refinement of these properties avoids significant errors in the determination of normal stresses in the cross-section, which in turn affects the overall spatial stability and operational reliability of the structure.

The use of refined properties ensures a uniform distribution of stresses, more rational use of material strength and avoidance of local overloads, which is critical for thin-walled elements. Taking these factors into account improves the accuracy of calculations, reduces the material consumption of structures, improves technical and economic performance, and ensures the durability of the designed objects. The calculations that use these geometric characteristics include the conventional calculation of beams for general stability and an alternative calculation based on the second-order theory; calculation for the combined effect of transverse bending (in one or two planes) and torsion due to eccentricity of load application; calculation of beams with damage and distortion.

Keywords: geometrical properties, open cross-sections, bending, torsion.

Стаття надійшла 06.05.2025 р.

УДК 621.867.2

doi.org/10.31498/2522-9990292025330264

Нефьодов І.О., Лаврик В.П., Суглобов В.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФРОНТАЛЬНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ

Досліджено умови експлуатації навантажувачів в морських портах та виникаючі при цьому пошкодження вантажопідійомників. Розроблено твердотільні моделі для дослідження напружено-деформованого стану металоконструкції вантажопідійомника автонавантажувачів методом кінцевих елементів, які дозволили виявити найбільш навантажені ділянки - опора направляючого ролика, бічний лист внутрішньої рами, напрямний ролик.

Запропоновано використання пружних амортизаторів, які крім амортизації динамічних навантажень забезпечують демпфування коливань за рахунок внутрішнього тертя пружних матеріалів. Надано рекомендації щодо вибору матеріалів пружних амортизаторів для балансирних візків з урахуванням їхньої амортизуючої та демпфуючої здібностей.

Ключові слова: автонавантажувачі, вантажопідійомник, амортизуючи та демпфуючої здібності, матеріали пружних амортизаторів.

Постановка проблеми. В останні роки, у зв'язку зі збільшенням маси перевантажуваних вантажів у морських портах спостерігаються різке збільшення поломок фронтальних автонавантажувачів протягом малого періоду експлуатації. Проблема вирішується шляхом проведення аварійних та поточних ремонтів, проте це не дозволяє продовжити термін експлуатації навантажувача на тривалий період.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових публікацій [1,2] свідчить, що цій проблемі приділяється багато уваги, однак недостатньо вивченими є взаємодія сил, що діють на навантажувачі при різних режимах його експлуатації.

Найбільш інтенсивне використання навантажувачів спостерігається при вантажно-розвантажувальних роботах у портах для перевантаження та складування штучних вантажів (сляби, рулони, контейнери і т.д.). Широке застосування отримали навантажувачі зарубіжних фірм: "Тойота" (Японія), "Валмет" (Фінляндія), Сісу (Фінляндія), "Кальмар" (Фінляндія), "SMV" (Швеція), та інших.

Мета дослідження. Дослідження умов експлуатації навантажувачів і причин виходу з ладу вантажопідійомника, розробка заходів з підвищення надійності та довговічності, забезпечення працездатності в реальних умовах експлуатації. Розробка 3D моделей, які дозволяють методом кінцевих елементів дослідити напружено-деформований стан металоконструкції вантажопідійомника, розподіл напружень у закритих частинах металоконструкцій, надати кількісну оцінку напружень у конструкції.

Основний матеріал дослідження. Експлуатація навантажувачів відбувається при великих перепадах температур, в умовах підвищеної вологості, запиленості, в агресивних середовищах і режимах динамічних перевантажень, які проявляються при транспортуванні з непостійною швидкістю руху, різких розворотах і поворотах з вантажем, передачі вантажу з вил на вила навантажувача, у разі подолання перешкод у процесі руху.

Обстеження навантажувачів з різним терміном експлуатації виявило такі несправності вантажопідійомного механізму: зношування робочих поверхонь зовнішньої або внутрішньої рами; кольори побіжалості поверхонь катання роликів і катків рам і кареток; поломка вила навантажувача; тріщини у металоконструкції рам, вили навантажувача, плити каретки; зріз опор ковзанок рами, кріпильних елементів; вигін зовнішньої або внутрішньої рами; обрив на зварюванні металоконструкції рам, місць зварювання опори катка та бічних листів рами; вм'ятини на металоконструкціях рам; заклинювання, заїдання у гідроциліндрах вантажопідійомника, роликах та котках рам; перетирання у блоках, ланцюгах.

На підставі проведеного аналізу пошкоджень навантажувачів з різним терміном експлуатації виявлено, що найбільш часто зустрічаються дефекти, якими є тріщини у рухомій і нерухомій рами в області з'єднання бічного листа з опорами направляючих котків.

Виявлені тріщини розташовані у зварних швах та зоні сплавлення профілю рами, у зварних швах кронштейна стійок гідроциліндрів та опор напрямних котків. Ремонт у вигляді механічної обробки та повторного зварювання не вирішує проблеми довговічності роботи вузлів.

Аналіз типів підійомно-транспортних машин і механізмів, застосовуваних при вантажно-розвантажувальних роботах у морських портах показав, що машини безрейкового транспорту напільного типу отримали найбільшого поширення, тому що володіють універсальністю, внаслідок можливості застосування широкої номенклатури швидко замінюваних вантажозахоплювальних пристроїв у поєднанні з мобільністю, автономністю приводу і відсутності прив'язки до певного місця. На рисунку 1 показаний один з варіантів автонавантажувача з вантажопідійомником дворамної конструкції



Рисунок 1 – Фронтальний автотранспортер з вантажопідіймником дворадної конструкції

Більшість методів проектування і конструктивних рішень не враховують специфіку експлуатації навантажувачів в умовах технологічних ліній морських портів і ряд режимів навантаження (залізничні переїзди; нерівності шляху пересування як на причалі, так і в трюмі судна; наявність поодиноких перешкод), які призводять до зниження їхньої довговічності.

Для вирішення завдань щодо підтримки працездатності та підвищення довговічності автотранспортерів необхідні конкретні дослідження, такі як:

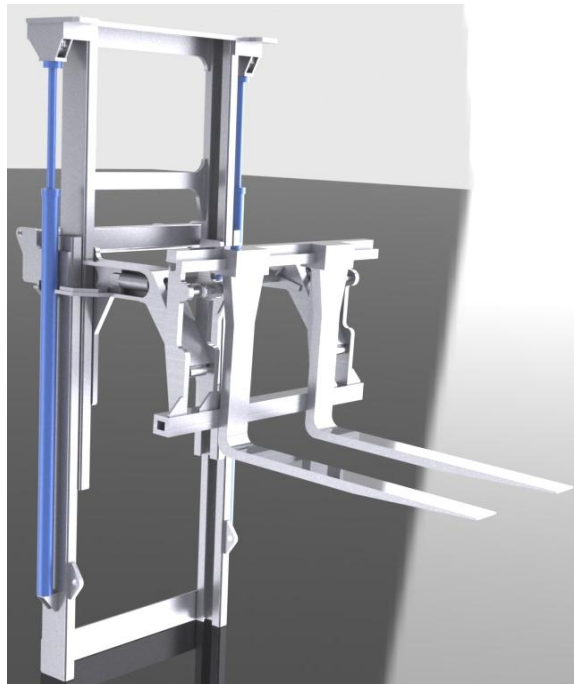
- визначення навантажень на несучу систему автотранспортера;
- оцінка жорстких характеристик автотранспортера та їх впливу на власні динамічні характеристики навантажувача [3];
- оцінка величини допустимих експлуатаційних швидкостей машини.

При цьому, проектування нових навантажувачів з метою зниження динамічних навантажень, необхідно вести з використанням математичних моделей формування зовнішніх навантажень, які базуються на режимах навантаження основних силових елементів при русі по нерівності шляху і при фронтальному наїзді на перешкоду [4,5].

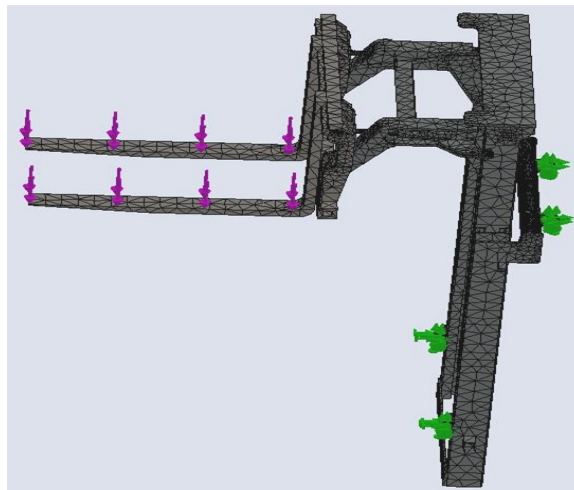
Вивчення закономірностей руху навантажувачів вантажопідіймністю більше 12 т по нерівності шляху раніше не було актуальним, оскільки використовувалися вантажопідіймні механізми, рами яких були виконані з профілів підвищеної металоміцкості та високим коефіцієнтом запасу міцності всієї силової установки механізму підйому. При використанні полегшених конструкцій рам вантажопідіймника з С-подібним профілем виникла необхідність використання даних для точної оцінки навантажень вантажопідіймника і ресурсу навантажувача, що робить необхідним вивчення основних закономірностей руху навантажувача по нерівності шляху і наїзді на перешкоду.

Ремонт та відновлення деталей машин

З метою проведення аналізу напружено-деформованого стану несучих елементів автонавантажувача, розроблені 3D моделі (рисунки 2, 3), які дозволили методом кінцевих елементів дослідити напружено-деформований стан металоконструкції вантажопідйомника, розподіл напружень у закритих частинах металоконструкцій і кількісну оцінку напружень у конструкції. За результатами досліджень виконано аналіз пошкоджень у найбільш навантажених місцях металоконструкції вантажопідйомника, які експлуатуються в морських портах, та їх порівняння з аналогічними результатами, наведеними в роботах інших авторів.



а)



б)

Рисунок 2 – Твердотільна модель:

а) - загальний вигляд вантажопідйомника навантажувача; б) – сітка на тілі 3D моделі для застосування методу кінцевих елементів

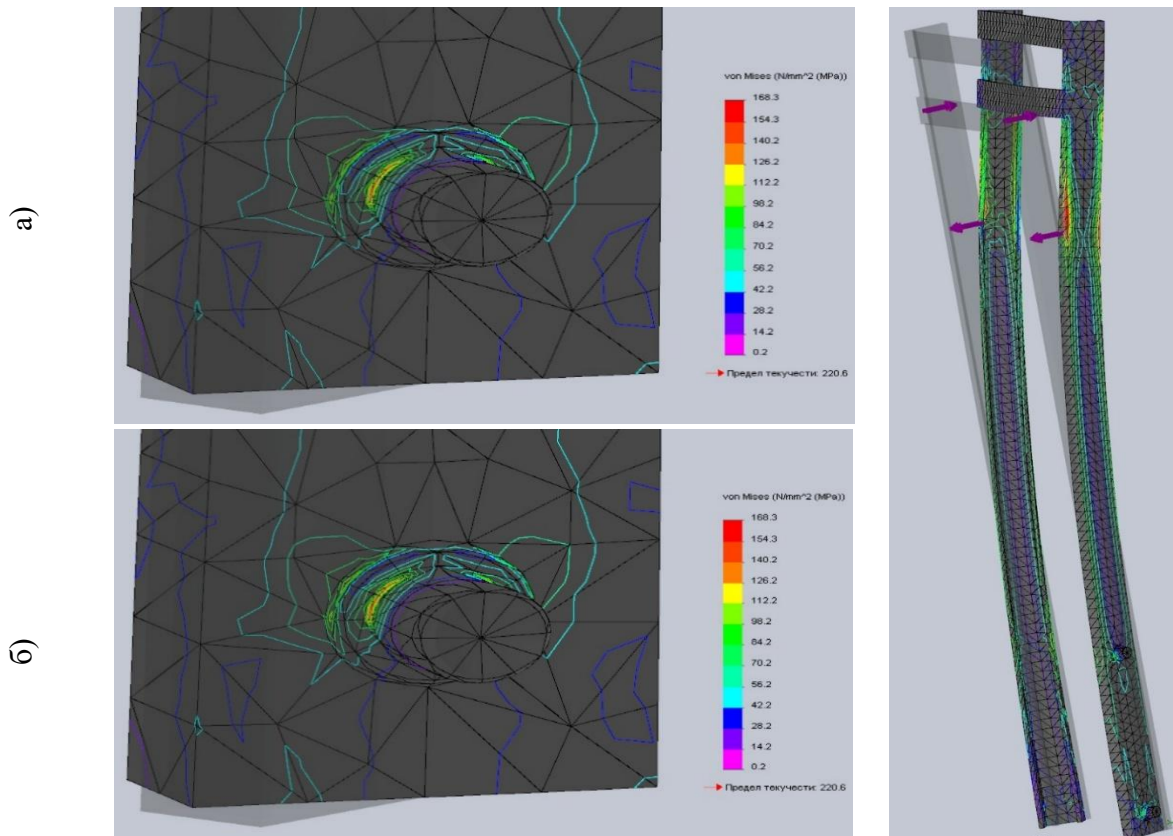


Рисунок 3 – Розподіл еквівалентних напружень вантажопідійомника:

а) - верхній напрямний каток; б) - нижній напрямний каток

Рівень динамічних навантажень оцінювався коефіцієнтом динамічності. Опори (верхні та нижні) напрямних котків є найбільш навантаженими, т.к. сприймають горизонтальне навантаження, яке виникає під час руху навантажувача по нерівності шляху пересування.

Дослідження умов експлуатації автонавантажувачів та системи технічного обслуговування та ремонту структури пошкоджень зварних з'єднань показало, що суттєвий вплив на довговічність вантажопідійомника автонавантажувача мають циклічні навантаження.

Оцінка навантажень металоконструкції у процесі експлуатації дозволила встановити причини появи дефектів у зазначених вузлах.

Встановлено конструкційний модуль пружності матеріалу.

Запропоновано нову конструкцію балансиру розвантажувального візка (рис. 4 а), що враховує жорсткість пружних елементів, яка залежить від форми і типу їх закріплення (рис. 4 б).

Було визначено технічні характеристики балансирних розвантажувальних візків, що дозволяють отримати еквівалентні коефіцієнти жорсткості для різних автонавантажувачів.

Аналіз отриманих даних показав, що як матеріал демпферів доцільно застосування поліуретану, який має високий опір розриву, високу зносостійкість і здатність витримувати великий тиск поряд з великою еластичністю, маслостійкістю і теплостійкістю, значним внутрішнім тертям.

Визначальним фактором напружено-деформованого стану балансирного пристрою є його жорсткість і можливість демпфування.

Ремонт та відновлення деталей машин

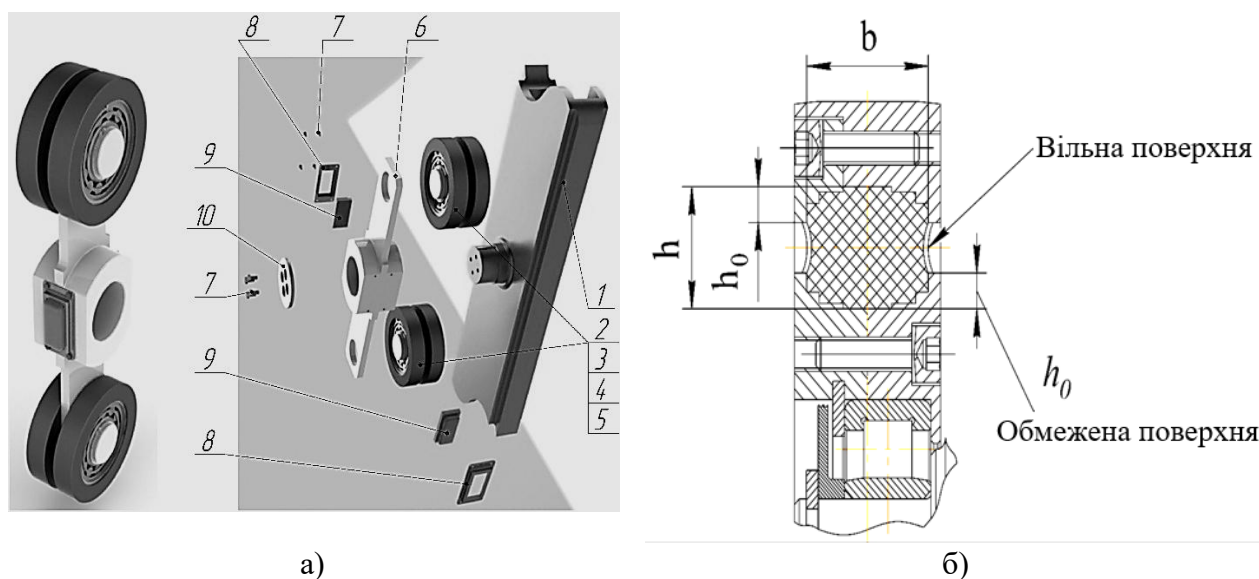


Рисунок 4 – Балансирний візок з опорою розташованої в центрі:

а) - конструкція балансирного візка; б) - схема до розрахунку параметрів пружного амортизатор

При встановленні демпферів (4 на один балансирний вузол) найменші значення коефіцієнта динамічності спостерігаються при використанні поліуретану.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу роботи фронтальних автонавантажувачів встановлено, що при переміщенні вантажів навантажувачі піддаються дії додаткових динамічних навантажень, пов'язаних з переміщенням по нерівності колії.

Розроблено твердотільні моделі для дослідження напружено-деформованого стану металоконструкції вантажопідіймника автонавантажувачів методом кінцевих елементів, які дозволили виявити найбільш навантажені ділянки - опора направляючого ролика, бічний лист внутрішньої рами, напрямний ролик.

Запропоновано використання пружних амортизаторів, які крім амортизації динамічних навантажень забезпечують демпфування коливань за рахунок внутрішнього тертя пружних матеріалів. Надано рекомендації щодо вибору матеріалів пружних амортизаторів для балансирних візків з урахуванням їхньої амортизуючої та демпфуючої здібностей.

Підтверджено зменшення коефіцієнта динамічності при пересуванні фронтальних автонавантажувачів за рахунок встановлення в раму вантажопідіймника демпфуючого балансирного візка з 1,35 до 1,15.

Список використаних джерел

1. Суглобов В.В. Исследование условий эксплуатации и причин выхода из строя фронтальных автопогрузчиков / В.В. Суглобов, В.П. Лаврик, И.А. Нефёдов // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2005. – Вип. 15. – С. 101–104.

2. Суглобов В.В. Исследование причин отказов автопогрузчиков при эксплуатации в морских портах / В.В. Суглобов, В.П. Лаврик, И.А. Нефёдов // Підйомно-транспортна техніка – Дніпропетровськ: ДПТ, 2009. – № 3. – С. 103–108.

3. Нефёдов И.А. Разработка математической модели колебаний вилочного автопогрузчика / И.А. Нефёдов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: Сб. науч. трудов. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – Вып. 57. – С. 140–145.

4. Суглобов В.В. Разработка динамической модели автопогрузчика / В.В. Суглобов, В.П. Лаврик, И.А. Нефёдов // Підйомно-транспортна техніка. – Дніпропетровськ: ДПТ, 2006. – № 3. – С. 32 – 41.

5. Карпенко Т.Н. Исследование движения автопогрузчика после фронтального наезда на препятствие / Т.Н. Карпенко, И.А. Нефёдов // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – Донецьк: «Рекламно-видавнича фірма «Молнія», – 2012. – № 4. – С. 67–77.

Nefyodov I.O., Lavryk V.P., Suglobov V.V.

RESEARCH OF THE OPERATING CONDITIONS OF FRONT LOADERS

The operating conditions of forklifts in seaports and the resulting damage to forklifts were investigated. Solid-state models were developed to study the stress-strain state of the metal structure of the forklift truck's forklift using the finite element method, which allowed identifying the most loaded areas - the guide roller support, the side sheet of the inner frame, the guide roller.

The use of elastic shock absorbers was proposed, which, in addition to the absorption of dynamic loads, provide damping of vibrations due to the internal friction of elastic materials. Recommendations were given on the selection of elastic shock absorber materials for balance carts, taking into account their shock-absorbing and damping capabilities.

Keywords: forklifts, forklift, shock-absorbing and damping capabilities, materials of elastic shock absorbers.

Стаття надійшла 20.04.2025 р.

УДК 621.833.1

doi.org/10.31498/2522-9990292025330267

Суглобов В.В., Кльон А.М.

АНАЛІЗ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ДЛЯ СИЛОВОГО РОЗРАХУНКУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

У статті розглянуто сучасний стан нормативної бази для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач в Україні та світі. Проведено порівняння методик розрахунку міцності зубців циліндричних коліс, викладених у стандартах ISO 6336 та ГОСТ 21354-87.

Ключові слова: циліндричні зубчасті передачі, силовий розрахунок, стандарт.

Постановка проблеми. З 1 січня 2018 року, згідно з наказом ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», чинність міждержавних стандартів (ГОСТів), розроблених до 1992 року, в Україні було скасовано [1]. Незважаючи на це, автори навчальної та технічної літератури, виданої останніми роками, у розрахунках зубчастих передач продовжують посилалися на згаданий міждержавний стандарт (див., наприклад, [2]).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Довгий час українська інженерна практика спиралася на стандарти колишнього СРСР — ГОСТи. Зокрема, силовий розрахунок циліндричних зубчастих передач базувався на методиці, викладеній у ГОСТ 21354-87 [3], чинність якого було скасовано. З іншого боку, в українських технічних університетах і на виробничих підприємствах впроваджується дедалі більше західних систем автоматизованого проектування (САПР), у яких реалізовано методики розрахунку типових деталей і вузлів, зокрема зубчастих передач, що ґрунтуються на міжнародних стандартах. Так, наприклад, модулі розрахунку циліндричних зубчастих передач наявні в таких САПР, як Autodesk Inventor, KISSsoft, MDESIGN gear та ін.

Мета дослідження. Порівняльний аналіз сучасної національної нормативної бази для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач з відповідними міжнародними стандартами.

Основний матеріал дослідження. Стандарти для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач, чинні в Україні на сьогодні, наведено в табл. 1 [4 – 8] (до цієї таблиці також включено скасований ГОСТ 21354-87 з метою його подальшого порівняння з чинними національними та міжнародними стандартами).

Як впливає з наведених даних, основним нормативним документом для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач в Україні є ДСТУ ISO 6336, поділений на кілька окремих частин. При цьому структура та зміст цих частин повністю відповідають міжнародному стандарту ISO 6336:1996.

У табл. 2 наведено огляд актуальних на сьогодні міжнародних нормативних документів серії ISO 6336 [9], яка включає міжнародні стандарти, технічні специфікації та технічні звіти під загальною назвою «Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач».

Таблиця 1 – Українські стандарти для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач

Номер та назва стандарту	Відповідність міжнародним стандартам	Статус
ГОСТ 21354-87. Передачі зубчасті циліндричні евольвентні зовнішнього зачеплення. Розрахунок на міцність	DIN 3990-1-1987. Calculation of load capacity of cylindrical gears; introduction and general influence factors	Скасований
ДСТУ ISO 6336-1:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 1. Основні принципи, вступна частина і загальні коефіцієнти впливу	ISO 6336-1:1996 Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors	Чинний
ДСТУ ISO 6336-2:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 2. Розрахунок міцності активної поверхні зубців	ISO 6336-2:1996 Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 2: Calculation of surface durability (pitting)	Чинний
ДСТУ ISO 6336-3:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 3. Розрахунок на міцність зубців при вигині	ISO 6336-3:1996 Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 3: Calculation of tooth bending strength	Чинний
ДСТУ ISO 6336-5:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 5. Міцність і якість матеріалів	ISO 6336-5:1996 Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 5: Strength and quality of materials	Чинний
ДСТУ ISO 9084:2006. Розрахування навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих зубчастих передач. Застосування для швидкісних зубчастих передач та зубчастих передач з подібними вимогами	ISO 9084:2000 Calculation of load capacity of spur and helical gears —Application to high speed gears and gears of similar requirements	Чинний

Таблиця 2 – Огляд нормативних документів серії ISO 6336

Calculation of load capacity of spur and helical gears (Розрахунок вантажопідйомності прямозубих та косозубих зубчастих коліс)	Last edition (Остання редакція)	International Standard (Міжнародний стандарт)	Technical Specification (Технічна специфікація)	Technical Report (Технічний звіт)
Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors (Частина 1: Основні принципи, вступна частина і загальні коефіцієнти впливу)	3 (2019)	X		
Part 2: Calculation of surface durability (pitting) (Частина 2: Розрахунок міцності активної поверхні зубців (опір пітінгу))	3 (2019)	X		
Part 3: Calculation of tooth bending strength (Частина 3: Розрахунок на міцність зубців при вигині)	3 (2019)	X		
Part 4: Calculation of tooth flank fracture load capacity (Частина 4: Розрахунок навантажувальної здатності на злам бокової поверхні зубця)	1 (2019)		X	
Part 5: Strength and quality of materials (Частина 5: Міцність і якість матеріалів)	3 (2016)	X		
Part 6: Calculation of service life under variable load (Частина 6: Розрахунок терміну служби під змінним навантаженням)	2 (2019)	X		
Part 20: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel and hypoid gears) Flash temperature method (Частина 20: Розрахунок здатності до задирання (також застосовується до конічних та гіпоїдних передач) — Метод температури спалаху)	2 (2022)		X	
Part 21: Calculation of scuffing load capacity (also applicable to bevel and hypoid gears) — Integral temperature method (Частина 21: Розрахунок навантажувальної здатності на тертя (також застосовний до конічних та гіпоїдних зубчастих передач) — Інтегральний метод температури)	2 (2022)		X	
Part 22: Calculation of micropitting load capacity (Частина 22: Розрахунок навантажувальної здатності на мікропітінг)	1 (2018)		X	
Part 30: Calculation examples for the application of ISO 6336 parts 1, 2, 3, 5 (Частина 30: Приклади розрахунків для застосування ISO 6336 частин 1, 2, 3, 5)	2 (2022)			X
Part 31: Calculation examples of micropitting load capacity (Частина 31: Приклади розрахунків навантажувальної здатності на мікропітінг)	1 (2018)			X

Міжнародні стандарти містять методи розрахунку, що базуються на загальновизнаній практиці та пройшли перевірку часом. Технічні специфікації містять методики, які все ще перебувають на стадії розвитку та потребують подальшого вдосконалення. Технічні звіти мають інформативний характер і зазвичай містять допоміжні матеріали, наприклад приклади розрахунків.

Порівнюючи дані табл. 1 і табл. 2, можна зазначити, що національні стандарти ДСТУ базуються на першій редакції ISO 6336, затвердженій у 1996 році, тоді як чинні міжнародні стандарти серії ISO 6336 вже мають третю редакцію, ухвалену у 2019 році. Аналіз третьої редакції стандартів серії ISO 6336 у порівнянні з попередньою показав, що застосування

оновлених методик розрахунку в окремих випадках призводить до суттєвих змін у значеннях розрахункових коефіцієнтів запасу міцності циліндричних зубчастих коліс [10].

Водночас міжнародний стандарт ISO 9084:2006, на основі якого було затверджено відповідний національний стандарт ДСТУ ISO 9084:2006, наразі має статус скасованого.

Усе це дає підстави стверджувати, що на сьогодні існує певна невідповідність між чинними національними нормативними документами для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач і актуальними версіями відповідних міжнародних стандартів.

Практичну цінність становить також питання про ступінь відмінності між методиками силового розрахунку, викладеними у ГОСТ 21354-87 та ISO 6336 (незалежно від редакції). З метою орієнтовної оцінки таких відмінностей проведемо порівняльний аналіз основних формул для розрахунку контактної міцності зубців (табл. 3) та їх міцності на вигин (табл. 4) [3, 11, 12]. Величини, що входять до розрахункових формул, наведено в табл. 5.

Перед безпосереднім порівнянням розрахункових формул варто зазначити, що як ISO 6336:1996, так і ГОСТ 21354-87 ґрунтуються на німецькому стандарті DIN 3990:1987, який був одним із перших комплексних нормативних документів для розрахунку навантажувальної здатності циліндричних зубчастих передач. Відповідно, розрахункові методики, викладені в обох цих стандартах (а також у національних стандартах ДСТУ ISO 6336), повинні мати багато спільного та відрізнятися переважно деталями реалізації.

Таблиця 3 – Формули для розрахунку зубців на контактну міцність

ГОСТ 21354-87	ISO 6336-2:2019
Контактні напруження без врахування додаткових навантажень, (МПа)	
$\sigma_{H0} = Z_E Z_H Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{b_w d_1} \cdot \frac{u+1}{u}}$	$\sigma_{H0} = Z_E Z_H Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{b d_1} \cdot \frac{u+1}{u}}$
Розрахункові контактні напруження, Н/мм ² (МПа)	
$\sigma_H = \sigma_{H0} \sqrt{K_A K_{Hv} K_{H\beta} K_{H\alpha}}$	$\sigma_H = Z_{B(D)} \sigma_{H0} \sqrt{K_A K_\gamma K_{Hv} K_{H\beta} K_{H\alpha}}$
Припустимі контактні напруження, (МПа)	
$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_N}{S_{Hmin}} Z_L Z_R Z_v Z_w Z_X$	$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_N}{S_{Hmin}} Z_L Z_R Z_v Z_w Z_X$

Таблиця 4 – Формули для розрахунку зубців на міцність при вигині

ГОСТ 21354-87	ISO 6336-3:2019
Напруження вигину без врахування додаткових навантажень, (МПа)	
$\sigma_{F0} = \frac{F_t}{b m_n} Y_{FS} Y_\beta Y_\varepsilon$	$\sigma_{F0} = \frac{F_t}{b m_n} Y_F Y_S Y_\beta Y_B Y_{DT}$
Розрахункові напруження вигину, (МПа)	
$\sigma_F = \sigma_{F0} K_A K_{Fv} K_{F\beta} K_{F\alpha}$	$\sigma_F = \sigma_{F0} K_A K_\gamma K_{Fv} K_{F\beta} K_{F\alpha}$
Припустимі напруження вигину, (МПа)	
$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} Y_N}{S_{Fmin}} Y_R Y_X Y_\delta$	$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} Y_N Y_{ST}}{S_{Fmin}} Y_{\delta RelT} Y_{RrelT} Y_X$

Таблиця 5 – Параметри, що враховані у розрахунках міцності зубців

Позначення	Одиниц і виміру	Пояснення	Примітка
Z_E	$\sqrt{H/\text{мм}^2}$	Коефіцієнт, що враховує механічні властивості матеріалів спряжених зубчастих коліс	
Z_H	–	Коефіцієнт, що враховує форму спряжених поверхонь зубців в полюсі зачеплення	
Z_ε	–	Коефіцієнт, що враховує сумарну довжину контактних ліній	
$Z_\beta (Y_\beta)$	–	Коефіцієнт, що враховує нахил зубців при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
F_t	Н	Окружне зусилля на ділільному циліндрі	
$b_w (b)$	мм	Робоча ширина вінця зубчастої передачі	
d_1	мм	Ділільний діаметр шестерні	
u	–	Передатне число зубчастої передачі	
K_A	–	Коефіцієнт, що враховує зовнішнє динамічне навантаження	
$K_{Hv} (K_{Fv})$	–	Коефіцієнт, що враховує внутрішнє динамічне навантаження при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
$K_{H\beta} (K_{F\beta})$	–	Коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу навантаження по довжині контактних ліній при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
$K_{H\alpha} (K_{F\alpha})$	–	Коефіцієнт, що враховує розподіл навантаження між зубцями при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
$Z_{B(D)}$	–	Коефіцієнт однопарного зачеплення шестерні (колеса)	лише [11]
K_γ	–	Коефіцієнт нерівномірності навантаження в зачепленні	лише [11]
$\sigma_{Hlim} (\sigma_{Flim})$	МПа	Граничне значення контактної витривалості поверхні зубців (витривалості при вигині), що відповідає базовій кількості циклів напруження	
$S_{Hmin} (S_{Fmin})$	–	Мінімальний коефіцієнт запасу міцності при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
$Z_N (Y_N)$	–	Коефіцієнт довговічності при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
Z_L	–	Коефіцієнт, що враховує вплив в'язкості мастильного матеріалу	
Z_R	–	Коефіцієнт, що враховує вплив вихідної шорсткості спряжених поверхонь зубців	
Z_v	–	Коефіцієнт, що враховує вплив окружної швидкості	
Z_w	–	Коефіцієнт, що враховує перепад твердостей матеріалів спряжених поверхонь зубців	

Ремонт та відновлення деталей машин

$Z_X (Y_X)$	–	Коефіцієнт, що враховує розмір зубчастого колеса при розрахунку контактних напружень (напружень вигину)	
m_n	мм	Нормальний модуль	
Y_{FS}	–	Коефіцієнт, що враховує вплив форми зубців та концентрацію напружень	лише [3]
$Y_\delta (Y_{\delta RelT})$	–	Опорний коефіцієнт (враховує чутливість матеріалу до концентрації напружень)	
Y_ε	–	Коефіцієнт, що враховує вплив перекриття зубців	лише [3]
Y_F	–	Коефіцієнт форми зубців	лише [12]
Y_S	–	Коефіцієнт концентрації напружень	лише [12]
Y_B	–	Коефіцієнт товщини обода	лише [12]
Y_{DT}	–	Коефіцієнт збільшеної висоти зубця	лише [12]
$Y_R (Y_{RelT})$	–	Коефіцієнт, що враховує вплив шорсткості перехідної поверхні	

* Коефіцієнти, що входять до формул лише одного зі стандартів (ГОСТ 21354-87 або ISO 6336), вказані у примітках

Порівняльний аналіз основних розрахункових формул, наведених у табл. 3 та табл. 4, дозволяє стверджувати, що методики розрахунку навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач, викладені у ГОСТ 21354-87 та ISO 6336:2019, є дійсно суттєво схожими. Обидва стандарти при розрахунку контактної міцності зубчастих передач ґрунтуються на загальній теорії Герца, але використовують її у модифікованому вигляді, адаптованому до специфіки зубців шестерень. Розрахунок міцності на вигин базується на спрощеній моделі зубця як балки, з урахуванням емпіричних коефіцієнтів.

Розрахунок за ISO 6336:2019 є точнішим у порівнянні з розрахунком за ГОСТ 21354-87 завдяки врахуванню більшої кількості факторів, що впливають на міцність зубців циліндричного колеса.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз сучасної національної нормативної бази для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач та порівняння її з відповідними міжнародними стандартами показав:

1. У цей час міждержавний стандарт ГОСТ 21354-87, який регламентував розрахунок міцності зубців циліндричної зубчастої передачі, в Україні втратив чинність. Замість нього діючим є ДСТУ ISO 6336, що складається з кількох нормативних документів та повністю відповідає міжнародному стандарту ISO 6336:1996 (по суті, перший є тотожним перекладом останнього).

2. Національні стандарти ДСТУ базуються на першій редакції ISO 6336, затвердженій у 1996 році, в той час як сучасні міжнародні стандарти серії ISO 6336 мають третю редакцію, затверджену у 2019 році. Таким чином, на даний момент існує певна невідповідність національних нормативних документів для силового розрахунку циліндричних зубчастих передач з сучасними версіями відповідних міжнародних стандартів.

Порівняльний аналіз основних розрахункових формул, наведених у ГОСТ 21354-87 та ISO 6336:2019, дозволяє стверджувати, що обидва стандарти базуються на спільній методиці розрахунку міцності циліндричних зубчастих передач. Разом з тим розрахунок за ISO

6336:2019 є точнішим завдяки врахуванню більшої кількості факторів, що впливають на міцність зубців циліндричного колеса.

Список використаних джерел

1. НАКАЗ ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» від 14.12.2015 № 184 «Про скасування міждержавних стандартів в Україні, що розроблені до 1992 року». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0184774-15>
2. Гайдамака А. В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання / А. В. Гайдамака. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 275 с.
3. ГОСТ 21354-87. «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность».
4. ДСТУ ISO 6336-1:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 1. Основні принципи, вступна частина і загальні коефіцієнти впливу.
5. ДСТУ ISO 6336-2:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 2. Розрахунок міцності активної поверхні зубців.
6. ДСТУ ISO 6336-3:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 3. Розрахунок на міцність зубців при вигині.
7. ДСТУ ISO 6336-5:2005. Розрахунок навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих передач. Частина 5. Міцність і якість матеріалів.
8. ДСТУ ISO 9084:2006. Розраховування навантажувальної здатності циліндричних прямозубих і косозубих зубчастих передач. Застосування для швидкісних зубчастих передач та зубчастих передач з подібними вимогами.
9. International Organization for Standardization (ISO). URL: <https://www.iso.org>.
10. Hanspeter Dinner. Changes in ISO 6336:2019— Parts 1, 2, 3, 5 and 6 / GEAR TECHNOLOGY | June 2021, PP 54 – 63. URL <https://www.kisssoft.com/en/products/publications/brochures/changes-in-iso-63362019-parts-1-2-3-5-and-6>
11. ISO 6336-2:2019. Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 2: Calculation of surface durability (pitting)
12. ISO 6336-3: 2019. Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 3: Calculation of tooth bending strength.

Suglobov V.V., Klyon A.M.

ANALYSIS OF THE REGULATORY BASIS FOR FORCE CALCULATION OF CYLINDRICAL GEAR TRANSMISSIONS

The article examines the current state of the regulatory framework for the strength calculation of cylindrical gears in both national and international contexts. A comparative analysis of the methods for calculating the strength of cylindrical gear teeth, as outlined in the ISO 6336 and GOST 21354-87 standards, is provided.

Keywords: cylindrical gear transmissions, strength calculation, standard.

Стаття надійшла 10.05.2025 р.

УДК 621.91

doi.org/10.31498/2522-9990292025330269

АНАЛІЗ ВИХОДУ З ЛАДУ ВУЗЛІВ РОТОРНИХ ПИЛ

Для сучасного прокатного виробництва актуальним є питання міцності та надійності конструкцій роторних пил, які призначені для різання металопрокату.

Одним з основних факторів, який знижує надійність пили, є недостатня довговічність підшипників високошвидкісного дискового валу, що сприймає зусилля різання. Як відомо, при тривалій експлуатації роторних пил місце для посадки ріжучого диску на планшайбі зношується, інколи виникає похибка в отворі при виготовленні нового диску. Тому має місце ексцентриситет центру ваги диску, що приводить до значних вібраційних навантажень на підшипникові вузли.

Для успішного вирішення питань надійності металургійного обладнання необхідно організувати безперервно діючу систему збору та обробки даних про відмови обладнання в процесі експлуатації. Обробка таких даних дозволяє: встановити види функцій щільності ймовірності відмов; обґрунтувати математичні моделі, що відображають зміну надійності в часі; виявити елементи, які лімітують надійність металургійних машин і намітити заходи, спрямовані на усунення недоліків існуючого і спроектованого обладнання.

Критерієм відмови є стан деталей роторної пили, який унеможливорює її подальшу експлуатацію в заданому технологічному процесі. Критерієм граничного стану є вихід з ладу деталей пили, для заміни або відновлення яких потрібно проведення повного демонтажу всіх вузлів пили та проведення їх ремонту або заміни на нові. Найбільш схильним до зношування елементом пили є касета, що складається з двох барабанів та натяжного ролика, їх підшипників, ременів на барабанах та корпусу.

Ключові слова: міцність, надійність, ексцентриситет, пили, ріжучий диск.

Постановка проблеми. До теперішнього часу залишалися невирішеними питання надійності конструкцій роторних пил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно розрахунок міцності підшипників дискового валу роторних пил проводився методами статистики, враховуючи вагу шківів ремінної передачі, маховика планшайб з ріжучим диском і зусилля різання [1],[2],[3],[4]. Також зусилля різання дисковими пилами, зазвичай, визначались за допомогою питомої роботи різання [1],[3],[4]. Однак, в області режимів різання роторними пилами, тобто при товщині зрізу 0,05...2 мм, застосування цієї методики потребує проведення комплексу дослідницьких робіт з метою розширення сфери її застосування [5],[7],[8].

На сьогоднішній день науковцями нашої та інших країн проведено ряд досліджень та опубліковано деякі статті на тему підвищення стійкості до зносу та ефективності використання пил гарячого різання в умовах сучасного металургійного виробництва. При цьому залишалися невирішеними питання надійності цих конструкцій.

Мета дослідження. Метою роботи є аналіз виходу з ладу роторних пил шляхом статистичної обробки результатів дослідження за допомогою методики визначення кількісних значень показників надійності.

Основний матеріал дослідження. Одним з факторів, який знижує надійність пили, є недостатня довговічність підшипників високошвидкісного дискового валу, що сприймає зусилля різання. Як відомо, при тривалій експлуатації пили місце для посадки ріжучого диску на планшайбі зношується, інколи виникає похибка в отворі при виготовленні нового диску.

Тому має місце ексцентриситет центру ваги диска, що приводить до значних вібраційних навантажень на підшипникові вузли.

При аналізі конструкцій роторних пил, що використовуються в прокатному виробництві слід звернути увагу на одну особливість роторних пил — незважаючи на різке підвищення швидкостей подач і, відповідно, збільшення зусиль різання, потужності електродвигунів обертання дисків такі ж або навіть менше, ніж у пилок, наприклад, салазкових з тим же діаметром диска. Зазначене пояснюється тим, що в роторних пилах при великих швидкостях подачі власне процес різання триває десяти частки секунди, робота різання виконується як за рахунок потужності двигуна, так і за рахунок маховиків в приводі диска, які віддають кінетичну енергію, накопичену на холостому ході. Тому оскільки частину роботи різання перебирає маховик, двигун диска може мати меншу потужність ніж у салазкових пил. Однак під час різання відбувається зниження оборотів дискового валу, так звана просадка за швидкістю, тому продуктивність роторних пилок визначається часом відновлення двигуном номінальних оборотів. Лише після відновлення номінального числа оборотів може подаватися команда на виконання наступного різі. Просадка за швидкістю не тільки зменшує продуктивність роторних пил, але й викликає інтенсивне проковзування ременів в ремінній передачі механізму обертання диска, вважаючи, що під час різання двигун намагається підтримувати номінальну кількість оборотів. Це в свою чергу призводить к зносу як шківів так і потребує регулярної заміни зношених ременів. Тому необхідна подальша робота з удосконалення як обладнання для різання прокату так і технології розкрою прокату.

Для успішного вирішення питань надійності металургійного обладнання необхідно організувати безперервно діючу систему збору та обробки даних про відмови обладнання в процесі експлуатації. Обробка таких даних дозволяє: встановити види функцій щільності ймовірності відмов; обґрунтувати математичні моделі, що відображають зміну надійності в часі; виявити елементи, які лімітують надійність металургійних машин і намітити заходи, спрямовані на усунення недоліків існуючого і спроектованого обладнання. Крім того, дані про відмови використовують для розробки обґрунтованих методик розрахунку кількісних показників надійності; режимів профілактичного обслуговування та ремонтів; норм кількості запасних частин і ряду інших заходів щодо вдосконалення технічного обслуговування.

Дослідження надійності металургійного обладнання в реальних умовах експлуатації майже не піддається плануванню і вимагає великих витрат часу на отримання необхідного обсягу однорідних вихідних даних, бо фіксація відмов в технічній документації ведеться різними особами. Переваги цього способу, який полягає у фіксації відмов вузлів обладнання в агрегатному журналі, це низька ціна і повна відповідність експериментальних даних умовам експлуатації.

Методика визначення кількісних значень показників надійності зводиться до послідовного вирішення таких завдань, як збір даних, встановлення виду закону відмов, ступеня близькості емпіричного і теоретичного розподілів, обчислення параметрів закону відмов і надійності виробу, який досліджується.

Потік відмов роторних пил (напрацьованих до відмови) в годинах за рік їх експлуатації виражається наступним рядом:

Таблиця 1 – Потік відмов роторної пили

Ремонт та відновлення деталей машин

№	Відмови	Дата	Години
1	заміна касети	19.03.2009	
2	інший ремонт	16.04.2009	624
3	заміна касети	07.05.2009	528
4	заміна касети	19.06.2009	1008
5	інший ремонт	01.07.2009	264
6	інший ремонт	10.07.2009	216
7	інший ремонт	14.07.2009	96
8	інший ремонт	13.08.2009	720
9	інший ремонт	17.08.2009	96
10	заміна касети	20.08.2009	72
11	інший ремонт	23.12.2009	72

Попередня обробка експериментальних даних полягає в табулюванні за прийнятою ознакою, у нашому випадку за кількістю відмов, що припадають на заданий інтервал часу. Кількість інтервалів приймають в межах 8:12.

Орієнтовне значення інтервалу Δt можна визначити за формулою

$$\Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{1 + 3.3 \cdot \log n}, \quad (1)$$

де $t_{\max}$, $t_{\min}$ — максимальний та мінімальний доробок до відмови, год;
 n — загальна кількість відмов.

В нашому випадку

$$\Delta t = \frac{1008 - 72}{1 + 3.3 \cdot \log 11} = 212,72 \text{ годин.}$$

Будемо вважати, що в нашому випадку середнє значення $\Delta t = 200$ годин. У кожному інтервалі підраховуємо кількість відмов n_i . В результаті отримуємо варіаційний ряд випадкової величини (перший і другий стовбці табл. 2).

Таблиця 2 – Варіаційний ряд роторних пил

Δt , годин	n_i	n	$\frac{n_i}{n}$	$\sum \frac{n_i}{n}$	$\frac{n_i}{n \cdot \Delta t}$
1	2	3	4	5	6
0 - 200	4	11	0,3636	0,3636	0,0018
200 - 400	2	11	0,1818	0,1818	0,0009
400 - 600	1	11	0,0909	0,0909	0,0005
600 - 800	2	11	0,1818	0,1818	0,0009
800 - 1000	0	11	0	0	0
1000-1200	1	11	0,0909	0,0909	0,0005

Статистична функція розподілу розрахована шляхом послідовного обчислення частоти $\frac{n_i}{n}$, накопиченої частоти $\sum \frac{n_i}{n}$ емпіричної щільності ймовірності $\frac{n_i}{n \cdot \Delta t}$. Для визначення виду закону відмов статистичну функцію розподілу (перший і п'ятий стовбці табл. 2)

Ремонт та відновлення деталей машин

представляємо гістограмою (рис. 1), візуальний аналіз якої дозволяє прийняти гіпотезу про те, що відмови шламових відновлених і нових насосів описуються нормальним законом.

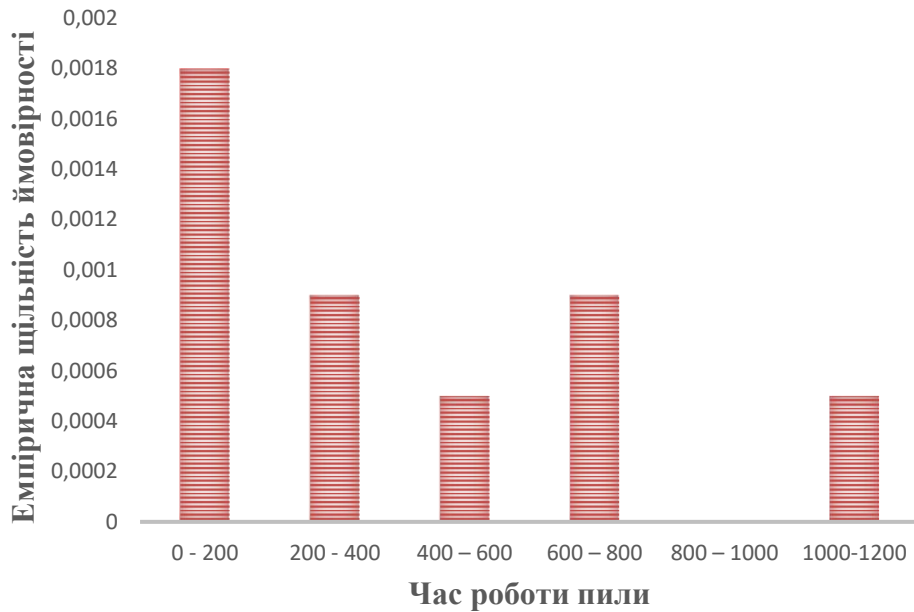


Рисунок 1 – Гістограма відмов роторних пил

Цей закон характеризується двома параметрами: математичним очікуванням напрацювання до відмови t_0 і середньоквадратичним відхиленням σ . Експериментальний розподіл відрізняється від теоретичного наявністю асиметрії (рис. 2, а) і ексцесу (рис. 2, б).

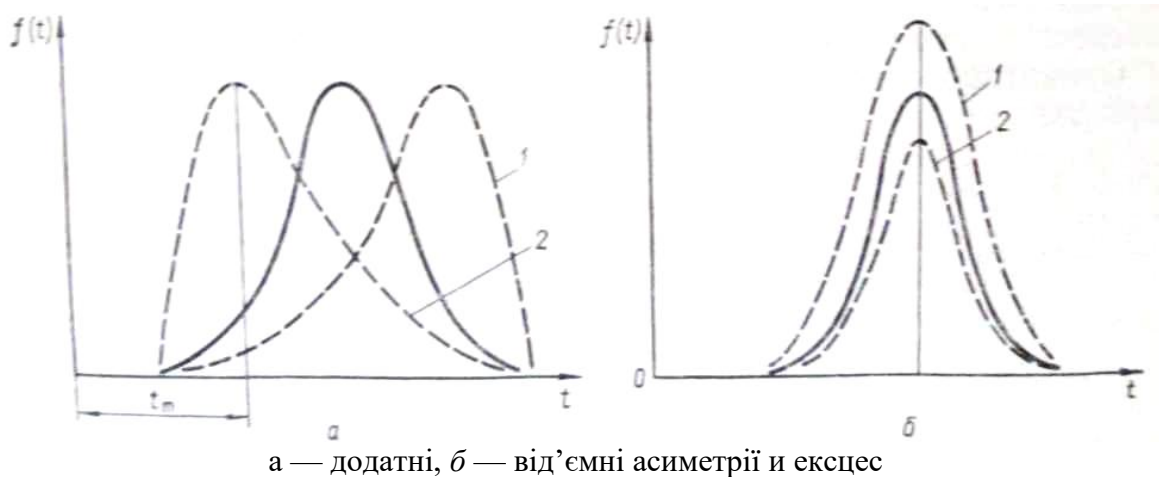


Рисунок 2 – Характерні похибки теоретичної кривої нормального розподілу.

Наявність асиметрії і ексцесу вказує на те, що експериментальний розподіл відрізняється від прийнятого теоретичного. Ця відмінність може бути випадковою, пов'язаною з обмеженою кількістю зареєстрованих відмов, або не випадковою, обумовленою неправильно обраною статистичною моделлю. Необхідно переконатися в тому, що прийнятий теоретичний розподіл (в нашому випадку нормальний) несуттєво відрізняється від експериментального. Для оцінки

Ремонт та відновлення деталей машин

ступеня їх близькості використовують критерії згоди (критерій Пірсона, критерій Колмогорова та ін.).

Розрахунки параметрів нормального закону відмов пов'язані з виконанням великої кількості обчислень. Спростити обчислення можна наступним чином. Центральні моменти μ_i не залежать від початку відліку. Тому за початок відліку приймаємо умовну середину варіаційного ряду (значення t_n відповідне максимальному Π_i), а дійсний варіаційний ряд замінюємо наведеним (табл. 3), члени якого отримуємо відніманням $t_n = 500$ з усіх значень t_i (другий стовпець табл. 3). Це призводить до зменшення оцінки математичного очікування доробок до відмови $\bar{t}_0$ на величину t_n . Отримані значення ділимо на Δt , що знову зменшить $\bar{t}_0$ в Δt раз, а оцінку дисперсії $\bar{\sigma}^2$ — в $(\Delta t)^2$ раз. Після перетворень змінна t_i замінюється змінною x_i четвертий стовпець табл. 3), яку визначаємо

$$x_i = \frac{t_i - t_n}{\Delta t}. \quad (2)$$

Таблиця 3 – Наведений варіаційний ряд відмов роторних пил

								Перевірка	
Δt	t_i	n_i	X_i	$n_i X_i$	$n_i X_i^2$	$n_i X_i^3$	$n_i X_i^4$	X_{i+1}	$n_i (X_{i+1})$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0 - 200	100	4	-2	-8	16	-32	64	-1	-4
200 - 400	300	2	-1	-2	2	-2	2	0	0
400 - 600	500	1	0	0	0	0	0	1	1
600 - 800	700	2	1	2	2	2	2	2	4
800 - 1000	900	0	2	0	0	0	0	3	0
1000 - 1200	1100	1	3	3	9	27	81	4	4
всього:		10		-5	29	-5	145	9	5

Імовірність безвідмовної роботи $p(t)$, щільність розподілу $f(t)$ і інтенсивність відмов $\lambda(t)$ при нормальному законі розподілу знаходимо за формулами:

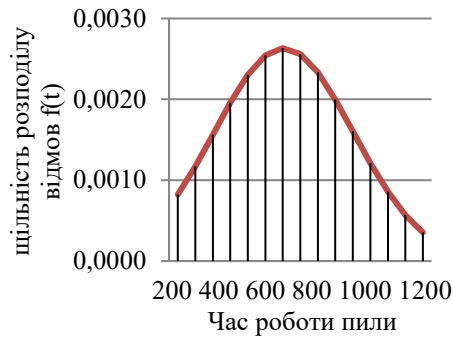
$$p(t) = \frac{1 + \Phi\left(\frac{t_0 - t_i}{\sigma}\right)}{1 + \Phi\left(\frac{t_0}{\sigma}\right)}; \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{2}{\left[1 + \Phi\left(\frac{t_0}{\sigma}\right)\right] \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t_i - t_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right]; \quad (4)$$

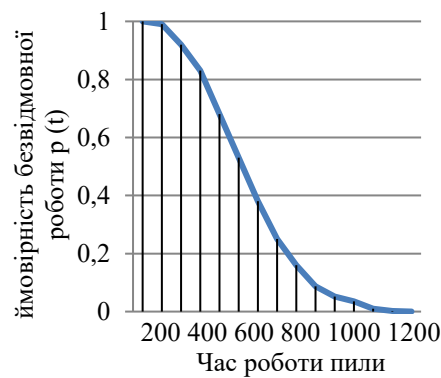
$$\lambda(t) = \frac{2}{\left[1 + \Phi\left(\frac{t_0 - t_i}{\sigma}\right)\right] \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t_i - t_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right]. \quad (5)$$

Результати розрахунків показників надійності роторних пил наведені на рис. 3.

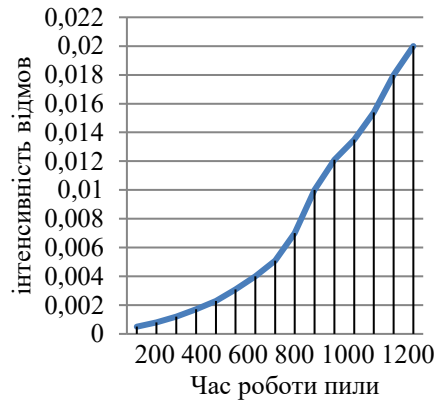
Ремонт та відновлення деталей машин



а



б



в

Рисунок 3 – а) щільність розподілу відмов $f(t)$; б) ймовірність безвідмовної роботи $p(t)$; в) інтенсивність відмов $\lambda(t)$

Згідно викладеним графікам (рис. 3) можна побачити, що зі збільшенням часу роботи пили ймовірність безвідмовної роботи знижується, і тим самим відбувається збільшення інтенсивності відмов.

ВИСНОВКИ

Виконано аналіз статистичних даних відмов роторних пил в умовах прокатного цеху, який дозволив встановити, що всі показники надійності пил описуються нормальним законом розподілу.

Показано, що ремонт роторних пил відомими методами не дозволяє виконати повноцінне відновлення їх працездатності, зокрема ймовірність відмови роторних пил зростає, що в результаті призводить до зниження терміну їх служби.

Список використаних джерел:

1. *Ищенко А. О., Лоза Є. А.* Пили горячего резания проката. Конструкции та розрахунок: Монографія // ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2012. – 251 с.
2. *Ищенко А. О.* Ділянки різання прокату дисковими пилами. – К.: Вища школа, 1989, – 61 с.
3. Розрахунок машин та механізмів прокатних цехів. Часть 6. Ножиці и пилы. Під ред. *Ширяєва А.В. / Ф.К. Иванченко, В.М. Гребеник, В.И. Ширяев.* – Маріуполь, ПДТУ, 2012. – 84 с.
4. *Гребеник В. М., Иванченко Ф.К., Ширяев В.И.* Розрахунок металургійних машин та механізмів. - Київ: Вища шк., 1988. – 448 с.
5. *Седуш В.Я.* Надійність, ремонт та монтаж металургійних машин. – К.: НМК ВО, 1992.–368 с.
6. *Павловський М.А.* Теоретична механіка: підручник для студентів вищих навчальних закладів// *М.А.Павловський.*– Київ: Техніка, 2002 – 512с.
7. *Паливода Ю. Є.* Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / *Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я.* – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.
8. Механічне обладнання металургійних заводів (устаткування прокатних цехів. *Добронос Ю.К.*– Краматорськ: ДДМА, 2019. – 50с.

Ishchenko A.O., Kapustin S.V., Volsky D.I.

ANALYSIS OF THE OUTAGE OF ROTARY SAW ASSEMBLY

For modern rolling production, the issue of strength and reliability of the structures of rotary saws, which are designed for cutting rolled metal, is relevant.

One of the main factors that reduces the reliability of the saw is the insufficient durability of the bearings of the high-speed disk shaft that perceives the cutting force. As is known, with prolonged operation of rotary saws, the place for seating the cutting disk on the faceplate wears out, sometimes an error occurs in the hole when manufacturing a new disk. Therefore, the eccentricity of the disk's center of gravity occurs, which leads to significant vibration loads on the bearing assemblies.

To successfully resolve issues of reliability of metallurgical equipment, it is necessary to organize a continuously operating system for collecting and processing data on equipment failures during operation. Processing such data allows: to establish types of failure probability density functions; to substantiate mathematical models that reflect changes in reliability over time; to identify

elements that limit the reliability of metallurgical machines and to outline measures aimed at eliminating the shortcomings of existing and designed equipment. The failure criterion is the condition of the parts of the rotary saw, which makes it impossible to continue its operation in a given technological process.

The criterion of the limiting state is the failure of the parts of the saw, for the replacement or restoration of which it is necessary to completely dismantle all the saw components and repair or replace them with new ones. The most susceptible to wear element of the saw is the cassette, which consists of two drums and a tension roller, their bearings, belts on the drums and the housing.

Keywords: strength, reliability, eccentricity, saws, cutting disc.

Стаття надійшла 11.04.2025 р.

УДК 004.056.53:519.17

doi.org/10.31498/2522-9990292025330270

Лещенко О. І.

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМНИХ ПОПРАВОК

Можливості сучасних CNC систем керування верстатами дають змогу перейти до побудови програм з елементами динамічного програмування, за якого КП являє собою п-кроковий процес ухвалення рішень залежно від прогнозованої зміни умов оброблення. У цьому разі можна сказати, що на вихідні параметри системи керування верстатом з ЧПК впливатимуть, окрім координат точок поверхні деталі ще змінні керування, значення яких залежать від стану системи на даному інтервалі траєкторії переміщення. Класичним прикладом такого способу нівелювання збурювальних впливів процесу обробки є адаптивні системи, проте вартість таких проектів, з урахуванням їхнього технічного супроводу в процесі експлуатації, зростає на порядок. Тому залишаються актуальними завданням створення алгоритмів управління, що базуються на результатах попереднього моніторингу динамічних процесів обробки на різних ділянках траєкторії формоутворення. Такий підхід дає змогу за мінімальних витрат автоматично отримувати необхідні параметри поверхонь деталей, без індивідуального налаштування на обробку кожної з них.

На основі досліджень, проведених на кафедрі «Технології машинобудування» у 2019 р. впроваджено у виробництво на металургійному комбінаті «Азовсталь» технологічний процес остаточної обробки валків сортового прокату типу «на попередньо налаштованих верстатах». Це стало можливим завдяки науково обґрунтованій методиці, що дає змогу прогнозувати і враховувати у вигляді системних поправок ймовірне значення похибки позиціонування верстата в кожній точці координатної площини. У перспективі, за відповідних досліджень можна отримати поправки для корекції програмної траєкторії, як реактори на збурювальну дію вектору сил різання, що змінюється за величиною і напрямком.

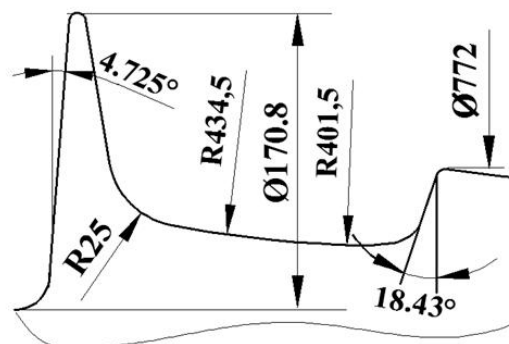
Включення в модель системи формоутворення розрахункових значень поправок шляхом їх підстановки в заголовки технологічних підпрограм для верстата з пристроєм ЧПК класу CNC і таким чином керувати вихідною точністю обробки деталі.

Ключові слова: верстати з ЧПК, параметричні функції, корекція, похибки формоутворення, керуюча програма (КП), валки рейкового прокату, норми оцінки точності позиціонування верстата з ЧПК, функції екстраполяції за даними вимірювань.

Постановка проблеми. Ґрунтуючись на статистичних даних минулого десятиліття можна сказати, що в експортному потенціалі України продукція металургійного комплексу займала основне місце. Якщо експорт листового прокату залишається експортом сировини, то профільний - сортовий прокат, це вже готова продукція. Найвищі вимоги висуваються до параметрів валків рейкового прокату (рис. 1, а), що має високий попит, як на території України, так і за її межами. Для виготовлення прокату цього типу застосовують валки з струмками складної форми (рис. 1, б), виготовлення яких виконують на вальцетокарних верстатах із жорсткою конструкцією станини, що дає змогу обробляти деталі великої ваги (до 10 т.) за великих зусиль у процесі різання. Водночас, за відмінних технологічних властивостей спеціалізованих верстатів вальцетокарного оброблення вони мають високу вартість. Наприклад, вальцетокарний верстат SKQ8485 (Anyang Xinheng Machine Tool Co., Ltd., Китай) - забезпечує отримання крутного моменту на шпинделі до 18000 Нм, оснащений спеціальним двопозиційним гідравлічним різцетримачем, дає змогу виконувати на ньому як чорнове, так і чистове оброблення, з ЧПК SINUMERIK 828D - має вартість до 110000\$. На сьогодні такі вкладення в основні фонди перевищують можливості вітчизняних підприємств.



а)



б)

Рисунок 1 – Валок рейкового прокату з базуванням в центрах на вальцетокарному верстаті, що закріплено у планшайбами передньої бабки (а); формоутворювальний струмок валка (б)

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Точність металорізального верстата записана в паспорті на обладнання та обумовлює можливість отримання розмірів певного квалітету точності які задані в кресленні деталі. Якщо регулярно проводилося технічне обслуговування верстата: змащування, чищення повітряних фільтрів електрошаф, експлуатація при зазначеному інтервалі температур, то ресурс обладнання відповідатиме паспортним даним. Однак найбільш навантажені частини важких верстатів – наприклад напрямні, часто вимагають ремонту в пріоритетному порядку.

Існує широкий спектр методів ремонту напрямних - шліфування, стругання та фрезерування, після наплавлення або по поверхнях напрямних заводу-виготовлювача, що є найбільш досконалим та продуктивним способом відновлення. Коли знос напрямних невеликий, то можливе їх шабрування силами ремонтних служб заводу.

Ефективним методом відновлення точності напрямних є їхнє оброблення переносними верстатами, встановленими безпосередньо на станину верстата, що ремонтується. Цей метод економічно вигідний, оскільки обробку напрямних виконують без зняття верстату з фундаменту, внаслідок чого відпадають витрати на демонтаж і повторний монтаж станини, з повторним вивірянням її установки. Недолік цього способу - обробку проводять на знижених режимах різання, оскільки присутність у процесі різання низькочастотних вібрацій може позначитися на мікрогеометрії поверхні напрямних.

Ремонт та відновлення деталей машин

Найефективніший метод, коли верстату можна повернути початкові характеристики точності - виконати капітальний ремонт верстата, з транспортуванням на базові верстатобудівні заводи, наприклад КЗТС (м. Краматорськ). Нині це вельми проблематично, виконувати ремонт такого рівня з урахуванням дефіциту комплектуючих і розриву технологічних і логістичних зв'язків.

Одним з основних показників точності токарних верстатів з ЧПК є точність позиціонування, під якою розуміють усереднене відхилення дійсного положення супорта верстата від заданого програмою, за умови його багаторазового виходу на позицію в різних точках координатної системи верстата (СКВ), з позитивного й негативного напрямків координатних осей.

ДСТУ 27843-88 встановлюють такі норми точності позиціонування:

- точність одностороннього позиціонування;
- повторюваність одностороннього позиціонування;
- точність двостороннього позиціонування;
- повторюваність двостороннього позиціонування;
- максимальна ширина зони нечутливості.

Розроблено велику кількість методичних рекомендацій з оцінки точності позиціонування верстата з ЧПК. Федеральне об'єднання німецьких інженерів (VDI Verein Deutscher Ingenieur [1]) пропонує метод статистичного оцінювання точності позиціонування за результатами низки вимірів, із визначенням їхніх статистичних характеристик:

- середнього арифметичного значення похибки позиціонування $\overline{\Delta Z}_{Ncp}^p$, $\overline{\Delta Z}_{Ncp}^m$, і $\overline{\Delta X}_{Ncp}^p$, $\overline{\Delta X}_{Ncp}^m$ по, кожній осі токарного верстата Z і X;
- середньоквадратичного відхилення σ_Z^p , σ_Z^m і σ_X^p , σ_X^m від програмно заданих значень під час переміщень у позитивному (σ^p) і негативному (σ^m) напрямках.

Обчислення середньоквадратичного відхилення зумовлене тим, що під час переміщення робочого органу, окрім систематичних помилок доводиться враховувати й випадкові величини, причому для технологічної системи, придатної для експлуатації, випадкові відхилення мають бути менше ніж систематичні.

Мета дослідження. Дослідити точність позиціонування вальцетокарного верстата з ЧПК і розробити теоретично обґрунтований метод зниження його похибки, шляхом введення поправок у системну область ОЗП пристрою ЧПК. Розробити методику, що дає змогу прогнозувати і враховувати у вигляді системних поправок імовірне значення похибки позиціонування верстата в окремій точці координатної площини верстата.

Основний матеріал дослідження. Для кожної осі верстата X і Z необхідно розрахувати середньоквадратичне п'яти відхилень від середнього арифметичного значення в кожній точці вимірювання, під час руху в «плюс (p)» і в «мінус (m)» за формулами:

- для осі X:

$$\sigma_{Xp} = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^5 (\Delta X_{p_Ncp})^2}{4}}, \quad \sigma_{Xm} = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^5 (\Delta X_{m_Ncp})^2}{4}}; \quad (1.1)$$

- повторюваність одностороннього позиціонування в точці по осі X:

$$6 \cdot \sigma_{Xp}, \quad 6 \cdot \sigma_{Xm}; \quad (1.2)$$

- для осі Z:

Ремонт та відновлення деталей машин

$$\sigma Z_p = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^5 (\Delta Z_p_{Ncp})^2}{4}}, \quad \sigma Z_p = \sqrt{\frac{\sum_{N=1}^5 (\Delta Z_p_{Ncp})^2}{4}}. \quad (1.3)$$

- повторюваність одностороннього позиціонування в точці по осі Z:

$$6 \cdot \sigma Z_p, 6 \cdot \sigma Z_m. \quad (1.4)$$

Нестабільність процесу позиціонування залежить не тільки від систематичних, а й від випадкових факторів технологічного процесу. Величина найімовірнішого розсіювання відхилень від систематичних похибок, коли їхнє поле розсіювання підпорядковане закону нормального розподілу (припущення знаходить підтвердження в роботах низки авторів [1] [2]), приймається рівною 3σ , а ширина всього поля розсіювання, що охоплює 99% усіх можливих відхилень $\pm 3\sigma$.

Максимальні (max) і мінімальні (min) значення похибки позиціонування в кожній точці вимірювання, з урахуванням середньоквадратичних відхилень можна визначити за наступними формулами:

за віссю X, max, під час переміщення в плюс (p) і мінус (m) відповідно:

$$X_{p_max} = \Delta X_{p_Ncp} + 3 \cdot \sigma X_p, \quad X_{m_max} = \Delta X_{m_Ncp} + 3 \cdot \sigma X_m; \quad (1.5)$$

за віссю X, min, під час переміщення в плюс (p) і мінус (m) відповідно:

$$X_{p_min} = \Delta X_{p_Ncp} - 3 \cdot \sigma X_p, \quad X_{m_min} = \Delta X_{m_Ncp} - 3 \cdot \sigma X_m; \quad (1.6)$$

за віссю Z, max, під час переміщення в плюс (p) і мінус (m) відповідно:

$$Z_{p_max} = \Delta Z_{p_Ncp} + 3 \cdot \sigma Z_p, \quad Z_{m_max} = \Delta Z_{m_Ncp} + 3 \cdot \sigma Z_m; \quad (1.7)$$

за віссю Z, min, під час переміщення в плюс (p) і мінус (m) відповідно:

$$Z_{m_max} = \Delta Z_{m_Ncp} - 3 \cdot \sigma Z_m, \quad Z_{p_min} = \Delta Z_{p_Ncp} - 3 \cdot \sigma Z_p. \quad (1.8)$$

У розрахунку точності позиціонування має бути врахована зона нечутливості b, що має місце під час реверсу переміщення супорта верстата. ДСТУ 27843-88 визначає зону нечутливості як різницю односторонніх відхилень від заданого положення в разі протилежних напрямків переміщення за цією координатною віссю:

$$X_b = \Delta X_{p_Ncp} - \Delta X_{m_Ncp}, \quad Z_b = \Delta Z_{p_Ncp} - \Delta Z_{m_Ncp}; \quad (1.9)$$

Тоді повторюваність двостороннього позиціонування в задане положення визначається:

$$\begin{aligned} & \text{- за віссю X: } X_w = |3 \cdot \sigma X_p + 3 \cdot \sigma X_m + |X_b||; \\ & \text{- за віссю Z: } Z_w = |3 \cdot \sigma Z_p + 3 \cdot \sigma Z_m + |Z_b||; \end{aligned} \quad (1.10)$$

Розглянемо експериментальне дослідження точності позиціонування вальцетокарного верстата з урахуванням поправок програмних переміщень.

Роботи проводилися на верстаті моделі DXW1250/3 з ЧПУ CNC-645, включеному до технологічної лінії чистового оброблення валків рейкобалкового виробництва, після виконання на ньому всього стандартного комплексу робіт із регулювання електромеханічного

Ремонт та відновлення деталей машин

слідкувального приводу верстата, який пройшов перевірку на відповідність нормам технологічної точності. Статистичні дані вимірювань точності позиціонування супорта верстата (рис. 2) вимірювали в координатній системі верстата (СКВ) $Z_{CT}X_{CT}$ за індикацією дисплея під час руху в «плюс» (р) і «мінус» (m) у діапазонах:

- за віссю X – (0÷500) мм, з дискретністю 50 мм; $\Delta\bar{X}_1^m \dots \Delta\bar{X}_N^m$, $\Delta\bar{X}_1^p \dots \Delta\bar{X}_N^p$;
- за віссю Z – (0÷1500) мм, з дискретністю 100 мм, $\Delta\bar{Z}_1^m \dots \Delta\bar{Z}_N^m$, $\Delta\bar{Z}_1^p \dots \Delta\bar{Z}_N^p$.

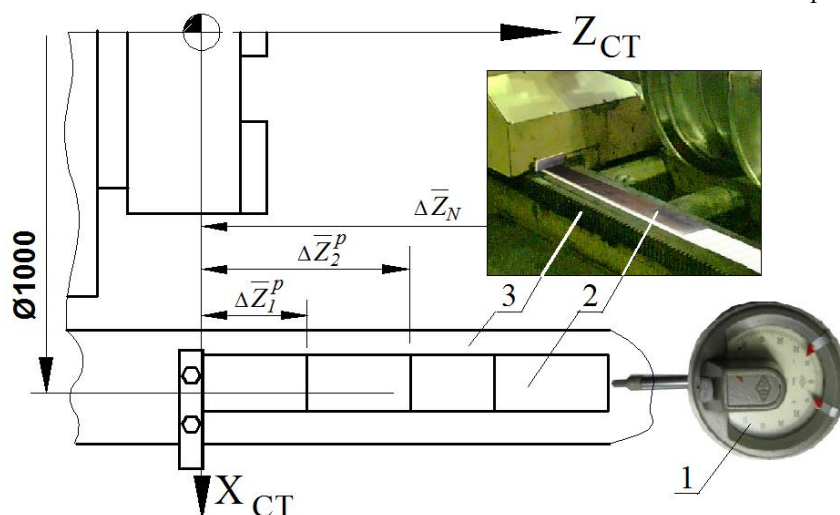


Рисунок 2 – Напрямна верстат 3 зі встановленими на ній плитками 2 кінцевих мір КМД №9 для вимірювання мікатором 1 моделі 13301 (ІПМ-1) похибки позиціонування верстата.

Вимірювання проводили пружинною вимірювальною голівкою 1 - мікатором моделі 13301 (ІПМ-1), (ціна поділки 0.001мм) і плоскпаралельними кінцевими мірами 2 довжини (КМД №9 кл. 1 Арт. 910-110), покладеними на напрямні верстата 3 через термоізолювальний папір. Згідно з нормами точності (ДСТУ 27843-88) вимірювання точності позиціонування проводили тричі, у різних умовах. Розглянемо їх по порядку.

1. Точність позиціонування верстата без корекції програмних переміщень

Заповнюємо таблицю 1 даних вимірювань і розрахункових даних, похибки позиціонування супорта за віссю X - інтервал вимірювань 0÷500 мм,

Таблиця 1 – Позиціонування по осі X, без корекції системних параметрів

Позиціонування в «плюс» (р), мкм											
X_N	X_{N2}^p	X_{N3}^p	X_{N3}^p	X_{N4}^p	X_{N5}^p	ΔX_{p_Ncp}	σX_p	X_{p_max}	X_{p_min}	X_b	X_w
50	4	11	11	12	7	9	3,39	19,17	-1,17	17,8	33,3
.....											
500	12	11	11	10	9	10,6	1,14	14,02	7,18	16,8	39,1
Позиціонування в «мінус» (m), мкм											
X_N	X_{N2}^m	X_{N3}^m	X_{N3}^m	X_{N4}^m	X_{N5}^m	ΔX_{p_Ncp}	σX_p	X_{p_max}	X_{p_min}		
50	-9	-10	-11	-7	-7	-8,8	1,79	-3,43	-14,17		
.....											
500	-17	-15	-19	-23	-18	-18,4	2,97	-9,50	-27,30		

у якій:

X_N - осьові координати точок позиціонування, де N - кількість вимірювань за віссю;

$X_{N1}^p \dots X_{N5}^p, X_{N1}^m \dots X_{N5}^m$ - для даної точки позиціонування, п'ять відхилень від заданого положення під час переміщення в «плюс» (p) і «мінус» (m) відповідно;

$\Delta X_p_Ncr, \Delta X_m_Ncr$, - середнє арифметичне з п'яти вимірів, відхилення від заданого положення під час переміщення в «плюс» (p) і «мінус» (m) відповідно;

$\sigma X_p, \sigma X_m$ - середнє квадратичне відхилення від заданого положення під час переміщення в «плюс» (p) і «мінус» (m) відповідно (1.10);

$X_{p_max} = \Delta X_p_Ncr + 3 \cdot \sigma X_p, X_{p_max} = \Delta X_p_Ncr - 3 \cdot \sigma X_p$ - граничні значення поля розсіювання розмірів від заданого положення під час переміщення в «плюс» (p) (1.10, 1.11);

X_b - розрахункове значення ширини зони нечутливості (1.9);

X_w - повторюваність двостороннього позиціонування (1.10).

Заповнюємо таблицю аналогічну за структурою табл. 1 для осі $Z \dots \dots$

Розрахунок норм точності позиціонування проводимо за формулами (1.1....1.10). Аналізуючи дані та графіки середнього відхилення позиціонування, ширини зони нечутливості та повторюваності виходу на позицію, бачимо, що поле розсіювання розмірів більше 0.05 мм. Розрахункові значення параметрів точності позиціонування вказують на недостатню реальну точність верстата для оброблення формотворчих поверхонь валків.

2. Точність позиціонування верстата з введенням у системну область пам'яті пристрою ЧПУ поправок, отриманих методом вимірювань на попередньому досліді.

Компенсуємо похибку позиціонування апаратно - програмним шляхом, записавши за допомогою спеціальної програми (адресація є в паспорті верстата) у відведений для цієї мети адресний простір ОЗП ЧПУ числові похибки у фіксованих точках кожної осі. Алгоритм роботи приводів верстата побудований так, що з координатами точок переміщення супорта, заданими в програмі оброблення деталі алгебраїчно складаються раніше записані в ОЗП ЧПУ односторонні відхилення від заданого положення (поправки) $\Delta X_p_Ncr, \Delta Z_p_Ncr$ і $\Delta X_m_Ncr, \Delta Z_m_Ncr$ за кожною віссю при русі в позитивному та негативному напрямках.

За встановлених значень поправок, отриманих на попередньому досліді, проводимо вимірювання похибки позиціонування супорта за осями X, Z , тобто вдруге виконаємо вимірювання точності позиціонування супорта верстата в серединних точках інтервалів попередніх вимірів і заповнюємо таблицю, даними вимірювань за типом таблиці 1. За формулами (1.1....1.10) проводимо розрахунки норм точності. Аналізуючи дані та графіки середнього відхилення позиціонування, ширини зони нечутливості та повторюваності виходу на позицію, бачимо, що точність позиціонування верстата підвищилася.

3. Точність позиціонування верстата, із записом в пристрій ЧПУ верстата поправок, розрахованих на основі функції екстраполяції, побудованої за даними вимірювань

Сучасні пристрої ЧПУ мають значний обсяг області системної пам'яті. Це дає можливість зменшувати інтервали вимірювань похибки позиціонування з метою запису їхніх значень у пам'ять пристрою ЧПУ верстата. Водночас це потребуватиме проведення більшої кількості вимірювань, що є досить трудомістким процесом, та у якому зростає ймовірність накопиченої похибки самих вимірювань.

Прогнозувати значення похибки позиціонування в точках координатної площини верстата можна за допомогою функцій, отриманих методом кубічної сплайн-інтерполяції $dX_N^p(x), dX_N^m(x), dZ_N^p(z), dZ_N^m(z)$ побудованих на основі дискретного ряду вимірювань. Процес інтерполяції полягає в тому, що в проміжках між точками, отриманими під час вимірювань, значення функції апроксимує кубічна парабола $A(t)=a \cdot t^3+b \cdot t^2+c \cdot t+d$, де коефіцієнти

Ремонт та відновлення деталей машин

a, b, c, d розраховуються виходячи зі значень координат граничних точок проміжку інтерполяції.

За даними дискретного ряду вимірювань ΔX_p_Ncp і ΔX_m_Ncp , ΔZ_p_Ncp і ΔZ_m_Ncp , засобами пакету Mathcad будуємо функції $A_m(z)$ і $A_p(z)$, які дають змогу екстраполювати ймовірну похибку позиціонування в будь-якій точці координатної площини.

Після введення поправок в ОЗП ЧПУ, отриманих на основі екстраполяції, проведені повторні вимірювання похибки позиціонування, що показали (табл. 2) підвищення параметрів точності програмних переміщень.

Таблиця 2 – Данні погрішності позиціонування супорта по осях X и Z

Параметри точності позиціонування	Позиціонування без корекції мкм		Позиціонування з корекцією методом екстраполяції, мкм	
	Під час руху в «плюс» (p)	Під час руху в «мінус» (m)	Під час руху в «плюс» (p)	Під час руху в «мінус» (m)
Центр угруповання, як середнє арифмет. на 10 інтервалах ΔX_Ncp	20,04	-19,76	8,82	-8,88
MAX(ΔX_Ncp)	27,8	-8,2	9,8	-5,4
MIN(ΔX_Ncp)	9	-30,6	6,6	-10,6
MAX(ΔX_Ncp) - MIN(ΔX_Ncp)	18,8	-22,4	3,2	-5,2
Центр угруповання, як середнє арифмет. на 10 інтервалах ΔZ_Ncp	20,0	-20,0	9,5	-8,6
MAX(ΔZ_Ncp)	28	-2	11	-2,8
MIN(ΔZ_Ncp)	9,6	-31,8	7	-10,4
MAX(ΔZ_Ncp) - MIN(ΔZ_Ncp)	18,4	-29,8	4	-7,6

Після проведених досліджень і введення поправок на координатні переміщення в ОЗП ЧПК результати вимірювань помилки позиціонування показали відносно підвищення параметрів точності на 50% ÷ 80%. Побудована гістограма (рис. 3) дає можливість візуально порівняти параметри точності верстата під час роботи без корекції та з корекцією програмних переміщень на основі розробленого методу.

Ремонт та відновлення деталей машин

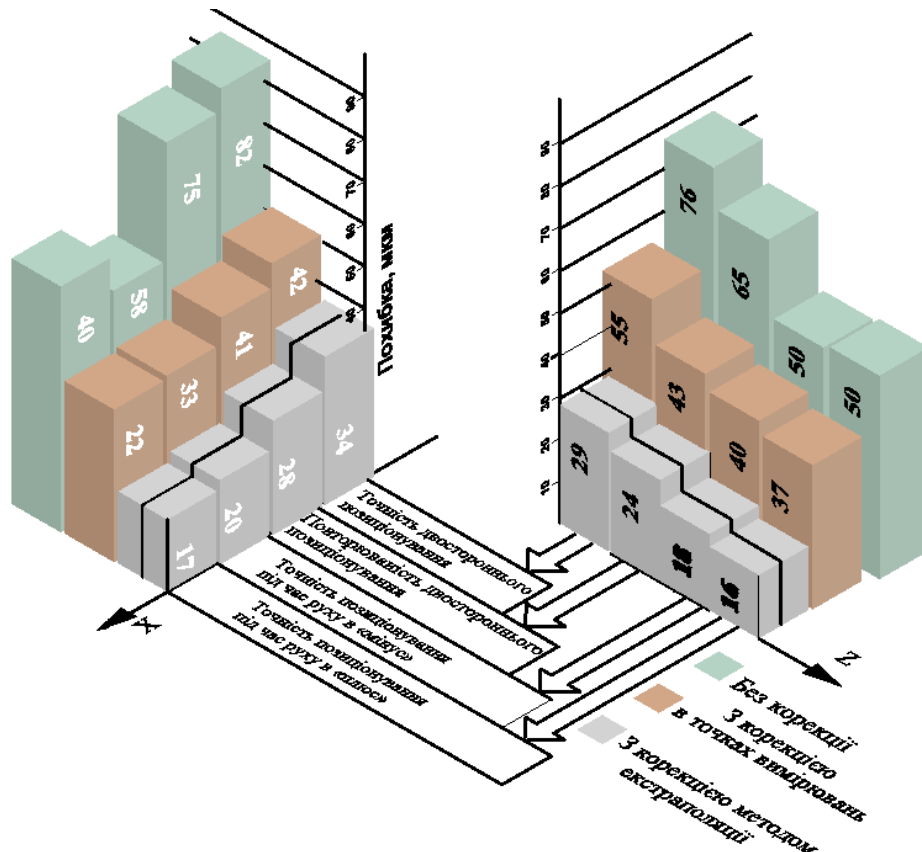


Рисунок 3 – Гістограма нормованих параметрів точності верстата з ЧПК:

- без корекції;
- з корекцією в точках вимірювань;
- з корекцією методом екстраполяції даних.

ВИСНОВКИ

Під час проведення цих досліджень, отримані інтерполяційні функції дають змогу визначити і записати в ОЗП ЧПУ похибки позиціонування для кожної з координатних осей, під час руху супорта в напрямі «плюс» або «мінус», Фактично похибки позиціонування від дискретно заданого аргументу у вигляді точок вимірювання подані функціями безперервного аргументу, що дають змогу отримати ймовірне значення кінематичної похибки супорта в кожній точці координатної площини.

Список використаних джерел

1. Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням: Навч. посіб. / Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. –[Електронний ресурс] / - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 158с.
2. Курс теорії ймовірностей : підручник / Б. В. Гнеденко – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2010. – 464 с.

METHODS OF INCREASING THE POSITIONING ACCURACY OF CNC MACHINE TOOLS BASED ON THE CALCULATION OF SYSTEM PARAMETERS

The capabilities of modern CNC machine tool control systems allow us to move to the construction of programs with elements of dynamic programming, in which the control represents an n-step process of decision making depending on the predicted changes in machining conditions. In this case, we can say that the output parameters of the machine control system will be influenced by the control variables characterizing the state of the system at a given interval of the trajectory, in addition to the coordinates of the workpiece surface points. Adaptive systems are a classic example of such a way of leveling the disturbing effects of the machining process, but the cost of such projects, taking into account their technical support during operation, increases by an order of magnitude. Therefore, the tasks of creating control algorithms based on the results of preliminary monitoring of dynamic machining processes at different parts of the forming trajectory remain relevant. This approach allows us to automatically obtain the required parameters of parts surfaces at minimum costs, without individual adjustment for machining of each of them.

On the basis of research conducted at the Department of "Machine Building Technology" in 2019 introduced into production at the metallurgical plant "Azovstal" technological process of final machining of rolls of long products on "pre-adjusted machines". This became possible thanks to a scientifically based methodology that allows you to predict and take into account in the form of system corrections, the probable value of the error of machine positioning at each point of the coordinate plane.

Keywords: CNC machines, parametric functions, correction, forming errors, control program (CP), rail rolling rolls, standards for assessing the positioning accuracy of a CNC machine, extrapolation functions based on measurement data.

Стаття надійшла 30.04.2025р.

ДОСЛІДЖЕННЯ АВАРІЙНОСТІ АВТОТРАНСПОРТУ В АСПЕКТІ СОЦІАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ

У роботі проведено комплексне дослідження аварійності автомобільного транспорту в контексті забезпечення соціальної безпеки населення. Розглянуто статистику дорожньо-транспортних пригод (ДТП) з постраждалими в Україні за семирічний період з 2017 по 2023 роки. У процесі аналізу було вивчено динаміку зміни кількості ДТП з постраждалими, а також кількості травмованих і загиблих осіб унаслідок таких подій. Проведено обчислення середньорічних показників для зазначених параметрів, що дозволило встановити загальні тенденції та виявити потенційно небезпечні фактори. На основі зібраних даних побудовано діаграми, які відображають відсотковий розподіл кількості ДТП з постраждалими за видами в середньому за рік.

Зокрема, встановлено, що найбільша частка випадків ДТП з постраждалими – 41% – припадає на зіткнення, яке, своєю чергою, є причиною близько 50% усіх випадків травмування. Разом із цим, найбільша частка загиблих – 35% – зафіксована внаслідок наїзду на пішохода. Таким чином, саме зіткнення транспортних засобів і наїзд на пішохода є основними видами ДТП, що спричиняють найвищу щорічну кількість постраждалих та загиблих осіб. У роботі також розглянуто кореляційні зв'язки між видом дорожньо-транспортної пригоди та кількісними наслідками у вигляді травм і смертей. Визначено лінійний коефіцієнт кореляції, побудовано поля розсіювання та лінії регресії для візуалізації взаємозв'язків між ключовими параметрами.

З метою прогнозування рівня аварійності запропоновано розроблення математичної моделі, що враховує взаємозалежність між типом ДТП та кількістю постраждалих і загиблих. Така модель дозволяє проводити аналітичні розрахунки, прогнозувати можливі ризики та приймати обґрунтовані управлінські рішення у сфері безпеки дорожнього руху. Реалізація результатів дослідження на практиці сприятиме підвищенню ефективності впровадження технічних, організаційних та економічних заходів щодо запобігання ДТП і зменшення їх тяжких наслідків. Запропоновані підходи можуть бути використані для удосконалення системи управління транспортною безпекою, а також у діяльності державних установ, органів місцевого самоврядування, страхових компаній і громадських організацій, зацікавлених у підвищенні рівня соціальної безпеки на автошляхах України.

Ключові слова: *автомобільний транспорт, аварійність, дорожньо-транспортні пригоди, травмовані, загиблі, соціальна безпека.*

Автомобільний транспорт є одним із ключових елементів транспортної системи країни, що забезпечує перевезення вантажів та пасажирів, та має критичне значення для економіки та соціального життя. Зростання інтенсивності дорожнього руху призводить до збільшення кількості аварій, що створює серйозні ризики для життя та здоров'я людей, а також впливає на якість перевезення вантажів, збереження їх в процесі транспортування. Завдання зниження травматизму на дорогах України наразі стоїть дуже актуально.

У Швеції була створена концепція «Vision Zero», яка стверджує, що будь-які дорожні смерті неприпустимі, і що відповідальні за це фахівці та управлінці повинні прагнути звести кількість смертельних випадків до нуля [1]. Країни Європейського Союзу в рамках концепції Vision Zero прагнуть досягти нульової смертності на дорогах до 2050 року. Середній показник

смертності внаслідок ДТП за рік в цих країнах складає близько 50 (від 28 до 96) людей на мільйон мешканців. І ця цифра зменшується кожного року [2].

Постановка проблеми. В результаті дорожньо-транспортних пригод (ДТП) страждає велика кількість вразливих учасників дорожнього руху: пішоходів, велосипедистів, дітей та людей похилого віку, особливо в міських районах. Демографічні зміни призведуть до збільшення частки цих учасників дорожнього руху та в майбутньому вимагатимуть особливої уваги. Для запровадження заходів щодо зменшення аварійності автомобільного транспорту потрібно дослідити вплив виду ДТП на наслідки їх скоєння з точки зору соціальної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематикою аварійності на автошляхах займається багато науковців. Авторами роботи [3] проведений аналіз причин аварійності на транспорті та сформовані основні напрямки забезпечення безпеки на транспорті. У роботі [4] досліджено вплив технічного стану рухомого складу та особистих якостей водіїв на аварійність автомобільного транспорту. Дослідження аварійності на автошляхах України, визначення викликів пов'язаних з безпекою роботи ліцензованого автомобільного транспорту з метою обґрунтування можливостей їх подолання для галузі виконано авторами роботи [5]. В роботі [6] авторами запропоновано використання критерію транспортних подій та обґрунтовано складові критерію та підходи до їх розрахунку. Наукові праці [7-8] висвітлюють питання безпеки перевезень, як фактору впливу на конкурентоспроможність транспортних послуг та впливу інновацій на стан аварійності на транспорті.

Дослідження які виконані у наукових працях присвячені аналізу аварійності на автошляхах, підходам та напрямкам забезпечення безпеки на автодорогах, дослідженню впливу різних факторів на аварійність автомобільного транспорту але не розглядають підходи щодо оцінки соціальної безпеки автомобільного транспорту.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є дослідження аварійності автомобільного транспорту в аспекті соціальної безпеки. Дослідження зв'язку між видом ДТП та його наслідками дозволить прогнозувати ризики соціальної загрози при перевезеннях автотранспортом.

Основний матеріал дослідження. В роботі [6] було запропоновано використання критерію транспортних подій та обґрунтовано складові критерію транспортних подій та підходи до їх розрахунку. Одним з них є критерій $k_{з,тр}$, що характеризує соціальну безпеку перевезень (кількість осіб загиблих та травмованих в результаті настання дорожньо-транспортної пригоди). Кожний випадок ДТП тягне за собою, як фінансові наслідки для учасників так і має соціальну відповідальність. Оцінка фінансових наслідків при виникненні ДТП з постраждалими особами стосується витрат пов'язаних з відшкодуванням збитків втрати здоров'я чи життя постраждалим особам. Для оцінки ризиків настання ДТП з постраждалими особами потрібно дослідити вплив виду ДТП на їх наслідки в аспекті соціальної безпеки.

У процесі обліку ДТП [9] всі автопригоди з загиблими та/або травмованими класифікують за наступними видами:

- зіткнення;- наїзд на пішохода;- наїзд на перешкоду;- перекидання транспортного засобу (ТЗ);- наїзд на велосипедиста;- наїзд на ТЗ, що стоїть;- інші (до яких відносяться такі види: падіння пасажирів, наїзд на тварин, наїзд на гужовий транспорт, падіння вантажів).

Всі види ДТП в силу різних причин їх виникнення та обставин скоєння викликають різний ступінь небезпеки, а отже і наслідків. З метою визначення соціального критерію безпеки перевезень, прогнозування ризиків соціальної загрози при перевезеннях автомобільним транспортом потрібно визначити ступінь їх наслідків за видами. Для цього проаналізуємо такі чинники системи: кількість ДТП з загиблими та/або травмованими за видами, $N_{та}$ (the number of traffic accidents), випадків; кількість загиблих в результаті настання певного виду автопригоди, $N_{дп}$ (the number of dead persons), осіб; кількість травмованих в результаті настання певного виду автопригоди, $N_{іп}$ (the number of injured persons), осіб.

Для аналізу даних візьмемо період 7 років з 2017 року по 2023 р.р. Статистика ДТП з загиблими та/або постраждалими за видами в Україні за період 2017-2023 р.р. наведена у табл. 1. (складено за даними джерела [9]).

Таблиця 1 – Статистика ДТП з загиблими та/або постраждалими за видами в Україні за період 2017-2023 р.р. (складено за даними джерела [9])

Вид ДТП	Назва показника, вимірник	Досліджуваний період, роки						
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Зіткнення	N _{та} , вип.	10795	9743	10569	10946	10376	7387	9792
	N _{др} , осіб	1030	1056	1133	1158	1085	937	1023
	N _{ір} , осіб	17077	15584	16519	16260	15007	11136	14830
Наїзд на пішохода	N _{та} , вип.	9338	8190	8612	7641	7509	5284	6499
	N _{др} , осіб	1274	1237	1261	1198	1148	874	931
	N _{ір} , осіб	8787	7591	8005	6959	6849	4799	6006
Наїзд на перешкоду	N _{та} , вип.	2662	2376	2574	2809	2505	2477	2918
	N _{др} , осіб	470	447	412	503	417	448	429
	N _{ір} , осіб	3627	3134	3298	3485	3216	3162	3620
Перекидання ТЗ	N _{та} , вип.	1685	1436	1729	2038	1762	1660	2068
	N _{др} , осіб	319	296	298	358	298	305	375
	N _{ір} , осіб	2385	1897	2251	2589	2309	2213	2673
Наїзд на велосипедиста	N _{та} , вип.	1668	1496	1526	1768	1355	1196	1447
	N _{др} , осіб	241	218	223	235	195	148	214
	N _{ір} , осіб	1495	1347	1392	1610	1208	1119	1299
Наїзд на ТЗ, що стоїть	N _{та} , вип.	584	544	542	512	564	374	474
	N _{др} , осіб	67	66	96	71	76	52	62
	N _{ір} , осіб	798	768	737	614	675	459	605
Інші	N _{та} , вип.	488	509	500	426	450	250	444
	N _{др} , осіб	31	30	31	18	19	27	19
	N _{ір} , осіб	508	563	534	457	474	257	469
Разом	N _{та} , вип.	27220	24294	26052	26140	24521	18628	23642
	N _{др} , осіб	3432	3350	3454	3541	3238	2791	3053
	N _{ір} , осіб	34677	30884	32736	31974	29738	23145	29502

Аналізуючи статистику ДТП з загиблими та/або постраждалими в Україні за період 2017-2023 р.р. виявлено:

- найбільша кількість ДТП з постраждалими відбулася у 2017 році – 27220 випадків;
- найбільша кількість загиблих осіб в результаті настання ДТП спостерігалася у 2020 році – 3541 особа;
- найбільша кількість травмованих осіб в результаті настання ДТП спостерігалася у 2017 році – 34677 осіб.

В середньому за 7 років випадки ДТП з постраждалими, N_{та}, за видами розподілилися таким чином:

Транспортні технології

- зіткнення – 9944 випадків, що складає 41 % від загальної кількості ДТП з постраждалими за рік;

- наїзд на пішохода – 7582 випадків (31 %);
- наїзд на перешкоду – 2617 випадків (11 %);
- перекидання транспортного засобу – 1768 випадків (7 %);
- наїзд на велосипедиста – 1494 випадків (6 %);
- наїзд на ТЗ, що стоїть – 513 випадків (2 %);
- інші – 438 випадків (2 %).

Кількість загиблих осіб в результаті настання ДТП, $N_{др}$, за видами розподілилися таким чином:

- зіткнення – 1060 осіб, що складає 32 % від загальної кількості загиблих осіб в результаті настання ДТП за рік;

- наїзд на пішохода – 1132 особи (35 %);
- наїзд на перешкоду – 447 осіб (14 %);
- перекидання транспортного засобу – 321 особа (10 %);
- наїзд на велосипедиста – 211 осіб (6 %);
- наїзд на ТЗ, що стоїть – 70 осіб (2 %);
- інші – 25 осіб (1 %).

Кількість травмованих осіб в результаті настання ДТП, $N_{іп}$, за видами розподілилися таким чином:

- зіткнення – 15202 особи, що складає 50 % від загальної кількості травмованих осіб в результаті настання ДТП за рік;

- наїзд на пішохода – 6999 осіб (23 %);
- наїзд на перешкоду – 3363 особи (11 %);
- перекидання транспортного засобу – 2331 особа (8 %);
- наїзд на велосипедиста – 1353 особи (4 %);
- наїзд на ТЗ, що стоїть – 665 осіб (2 %);
- інші – 466 осіб (2 %).

Діаграми відсоткового розподілу кількості ДТП з постраждалими за видами в середньому за рік (аналізований період 7 років), кількості загиблих та травмованих осіб наведена на рис.1.



Рисунок 1 – Діаграми відсоткового розподілу: а – випадків ДТП з постраждалими за видами в середньому за рік (аналізований період 7 років); б – загиблих осіб; в – травмованих осіб

Динаміка випадків ДТП за видами з постраждалими (загиблими та травмованими) за аналізований період наведена на рис. 2 – 4.

Транспортні технології

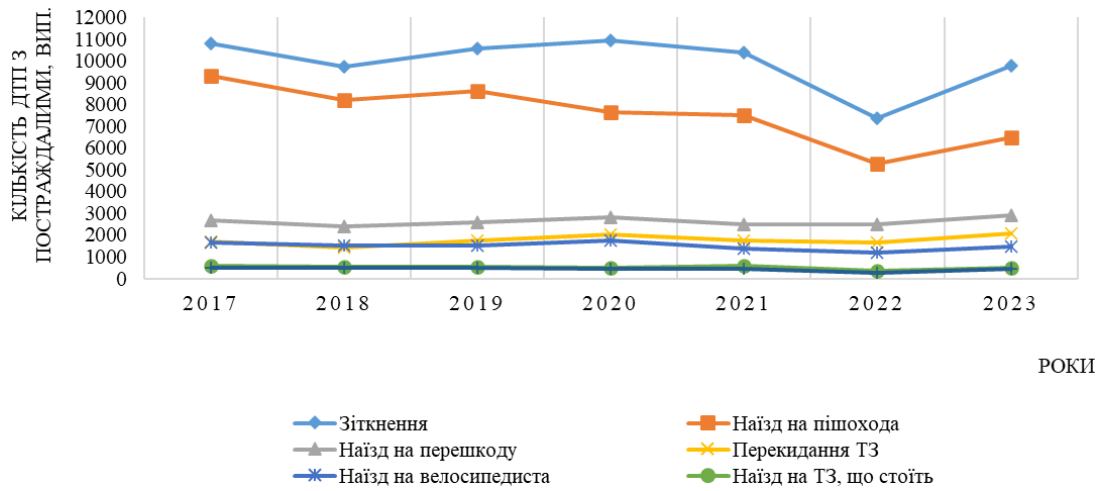


Рисунок 2 – Динаміка випадків ДТП з постраждалими за видами в Україні за період 2017 – 2023 р.р.

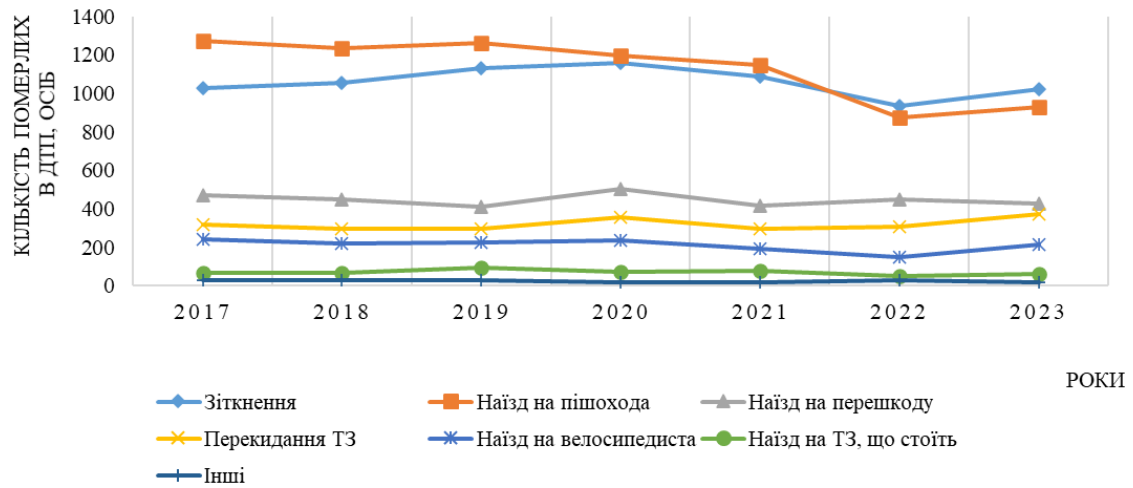


Рисунок 3 – Динаміка кількості померлих осіб в результаті настання ДТП за видами в Україні за період 2017 - 2023 р.р.

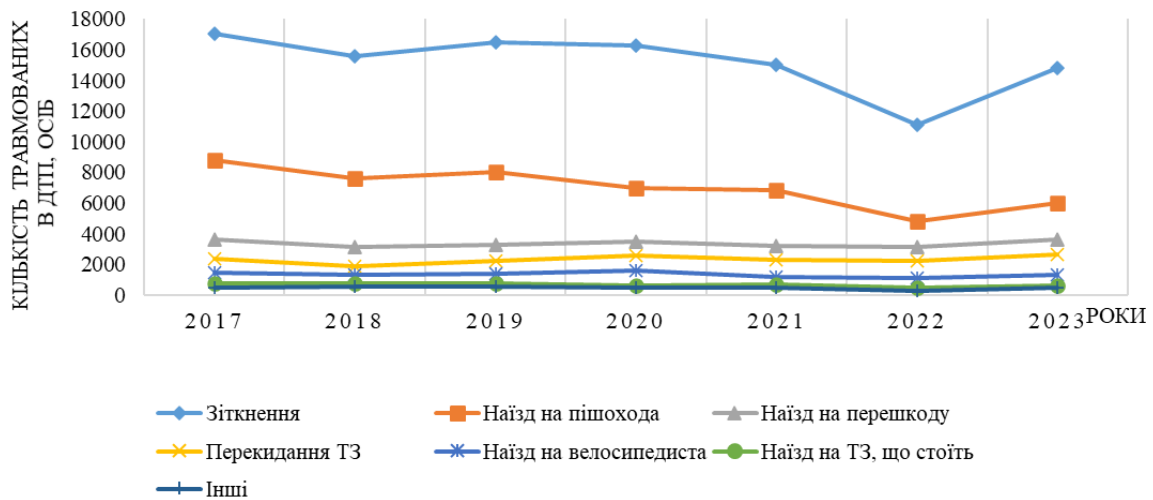


Рисунок 4 – Динаміка кількості травмованих осіб в результаті настання ДТП за видами в Україні за період 2017 - 2023 р.р.

Досліджуючи динаміку кількості ДТП за видами, кількості померлих осіб та постраждалих в результаті їх настання (див. рис. 2 – 4) можна зрозуміти, що основним видом ДТП з постраждалими є зіткнення та наїзд на пішохода.

З проведеного аналізу дослідження аварійності автомобільного транспорту можна відзначити, що в Україні спостерігається високий рівень його соціальної небезпеки. Підвищення рівня безпеки автотранспорту є основним завданням для перевізників, влади, громадськості, контролюючих та керівних органів в галузі автотранспорту. Одним з підходів до підвищення рівня соціальної безпеки автотранспорту є скорочення випадків ДТП, що характеризуються важкими наслідками, такими як загибель та травмування людей. Для того щоб скоротити кількість постраждалих осіб в результаті настання випадку ДТП потрібно дослідити вплив виду ДТП на кількість осіб, що постраждають в результаті його настання, тобто оцінити зв'язок між параметрами N_{ta} , N_{dp} та N_{ip} . Визначимо лінійний коефіцієнт кореляції r для вимірювання тісноти взаємозв'язку чинників системи: N_{ta} , N_{dp} та N_{ip} .

Лінійний коефіцієнт кореляції r обчислимо за формулою:

$$r = \frac{\overline{N_{ta}} \cdot \overline{N_{dp}} - \overline{N_{ta}} \cdot \overline{N_{dp}}}{\sigma_{N_{ta}} \cdot \sigma_{N_{dp}}}; r = \frac{\overline{N_{ta}} \cdot \overline{N_{ip}} - \overline{N_{ta}} \cdot \overline{N_{ip}}}{\sigma_{N_{ta}} \cdot \sigma_{N_{ip}}}, \quad (1)$$

де $\overline{N_{ta}}, \overline{N_{dp}}, \overline{N_{ip}}$ - середні значення параметрів N_{ta} , N_{dp} та N_{ip} ;

$\sigma_{N_{ta}}, \sigma_{N_{dp}}, \sigma_{N_{ip}}$ - середньо квадратичне відхилення параметрів N_{ta} , N_{dp} та N_{ip} .

Середньо квадратичне відхилення параметрів N_{ta} , N_{dp} та N_{ip} обчислимо за формулою:

$$\begin{aligned} \sigma_{N_{ta}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{ta_i} - \overline{N_{ta}})^2}{n}}; \\ \sigma_{N_{dp}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{dp_i} - \overline{N_{dp}})^2}{n}}; \\ \sigma_{N_{ip}} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{ip_i} - \overline{N_{ip}})^2}{n}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Результати розрахунків наведено у табл. 2-3.

Таблиця 2 – Результати вимірювання тісноти взаємозв'язку чинників системи N_{ta} та N_{dp} за видами ДТП

Вид ДТП	Середньо квадратичне відхилення параметрів		Лінійний коефіцієнт кореляції, r	Ступінь зв'язку
	$\sigma_{N_{ta}}$	$\sigma_{N_{dp}}$		
Зіткнення	1128,03	68,63	0,83	сильний
Наїзд на пішохода	1252,23	150,91	0,95	сильний
Наїзд на перешкоду	177,91	29,55	0,3	слабкий
Перекидання ТЗ	204,67	29,83	0,88	сильний
Наїзд на велосипедиста	175,95	29,04	0,92	сильний
Наїзд на ТЗ, що стоїть	65,78	12,68	0,61	сильний
Інші	81,99	5,63	0,19	слабкий

Таблиця 3 – Результати вимірювання тісноти взаємозв'язку чинників системи N_{ta} та N_{ip} за видами ДТП

Вид ДТП	Середньо квадратичне відхилення параметрів		Лінійний коефіцієнт кореляції, r	Ступінь зв'язку
	$\sigma_{N_{ta}}$	$\sigma_{N_{ip}}$		
Зіткнення	1128,03	1821,47	0,96	сильний
Наїзд на пішохода	1252,23	1219,46	1,0	сильний
Наїзд на перешкоду	177,91	196,14	0,88	сильний
Перекидання ТЗ	204,67	237,73	0,96	сильний
Наїзд на велосипедиста	175,95	154,21	0,99	сильний
Наїзд на ТЗ, що стоїть	65,78	108,38	0,93	сильний
Інші	81,99	92,30	1,0	сильний

Аналізуючи дані табл. 2 можна зробити висновок, про слабкий ступінь зв'язку параметрів N_{ta} та N_{dp} при наїзді на перешкоду і інших випадках ДТП. Тобто ці види транспортних пригод не обов'язково характеризуються наявністю загиблих осіб при їх скоєнні.

Аналізуючи дані табл. 3 можна зробити висновок, про сильний ступінь зв'язку параметрів N_{ta} та N_{ip} при всіх випадках ДТП.

Поле розсіювання та лінії регресії параметрів N_{ta} , N_{dp} та N_{ip} наведено на рис. 5 - 8.

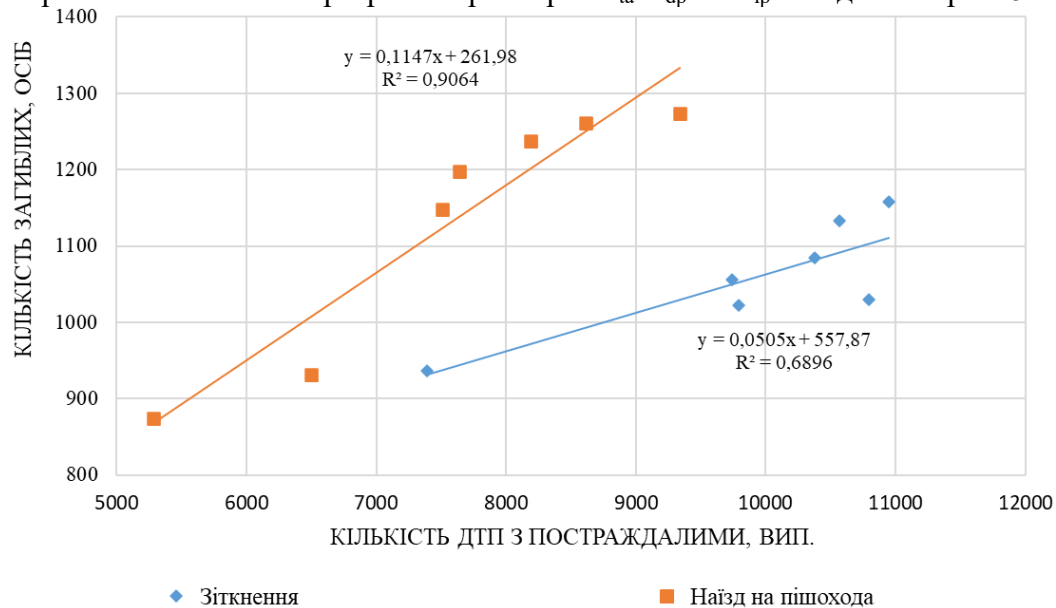


Рисунок 5 – Поле розсіювання та лінії регресії параметрів N_{ta} та N_{dp} при зіткненні та наїзді на пішохода

Транспортні технології

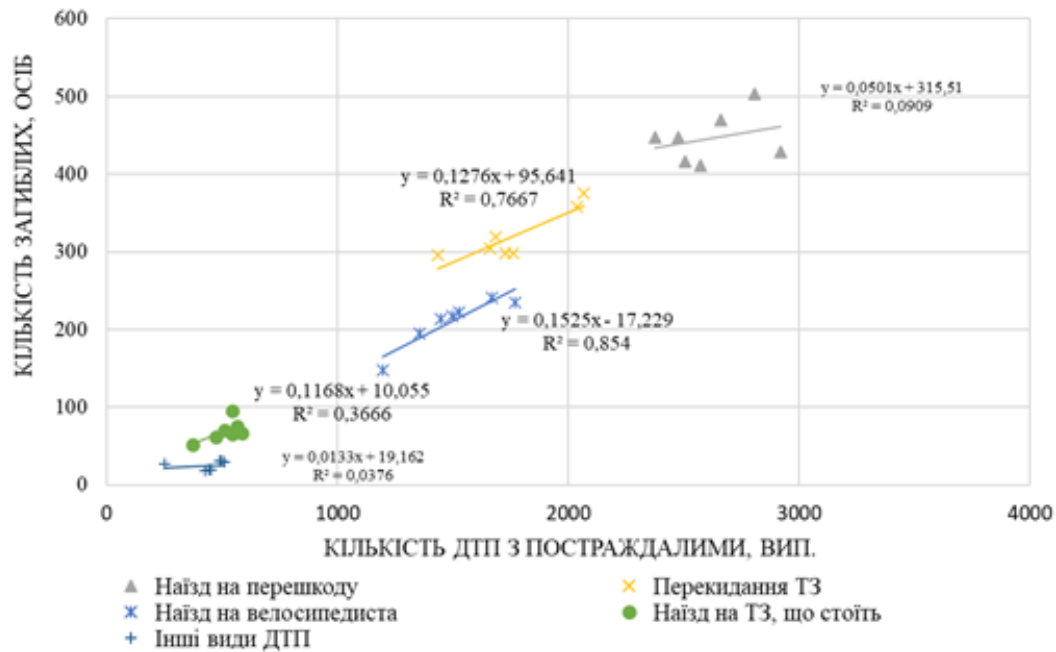


Рисунок 6 – Поле розсіювання та лінії регресії параметрів N_{ta} та N_{dp} при наїзді на велосипедиста, перешкоду та транспортний засіб, що стоїть, при перекиданні ТЗ та інших видах ДТП

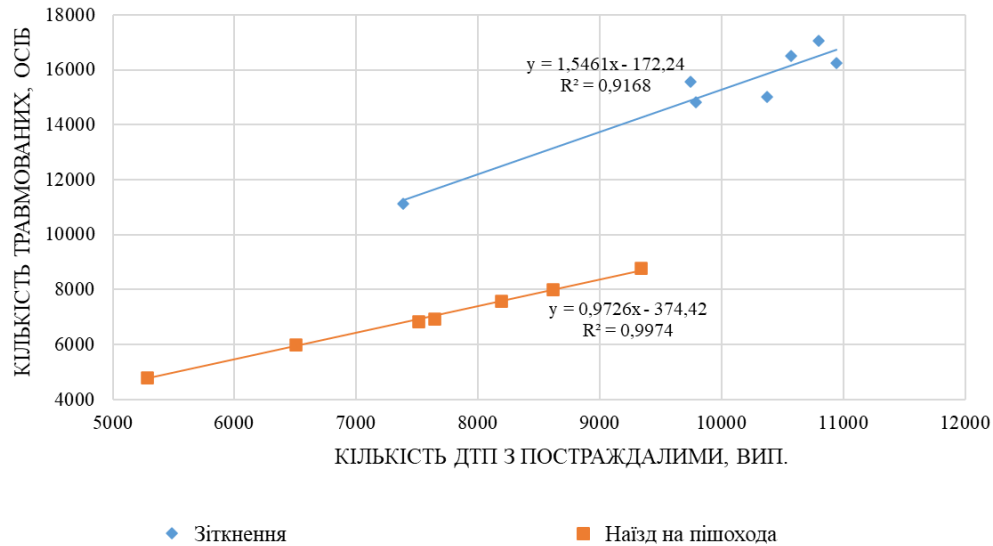


Рисунок 7 – Поле розсіювання та лінії регресії показників N_{ta} та N_{ip} при зіткненні та наїзді на пішохода

Транспортні технології

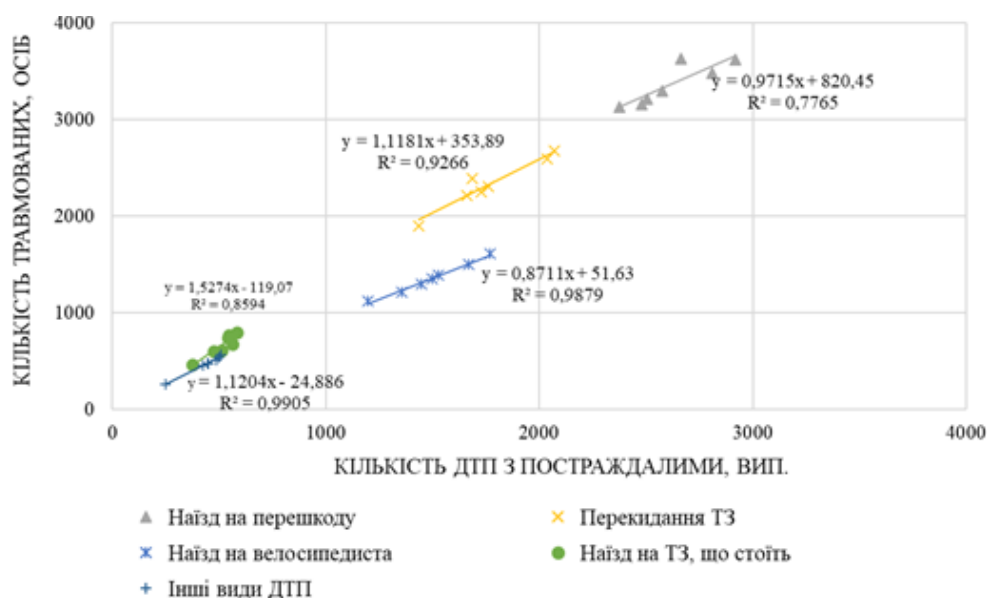


Рисунок 8 – Поле розсіювання та лінії регресії показників $N_{та}$ та $N_{іп}$ при наїзді на велосипедиста, перешкоду та транспортний засіб, що стоїть, при перекиданні ТЗ та інших видах ДТП

Для прогнозування ризиків соціальної небезпеки автотранспорту методом екстраполяції потрібно розробити математичну модель впливу параметрів системи: вид ДТП та кількість травмованих та померлих осіб в результаті її настання. Математичне моделювання дозволить прогнозувати рівень соціальної безпеки перевезень, впровадити заходи економічного, технічного, організаційного характеру для уникнення настання видів ДТП, що призводять до травмування та загибелі людей.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження встановлено, що в Україні щорічно на автошляхах трапляється 24357 випадків ДТП з постраждалими особами. За рік в результаті ДТП гине близько 3266 осіб, набувають травм 30379 осіб. Ці дані свідчать про високий рівень соціальної небезпеки автомобільного транспорту, тому завдання підвищення безпеки автотранспорту потребує нових підходів та методів для його вирішення.

Список використаних джерел

1. Vision Zero. Електронний ресурс: <https://visionzero.org.ua/about/> (дата звернення 24.11.2024 р.)
2. Road safety: Data show improvements in 2018 but further concrete and swift actions are needed Електронний ресурс: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_19_1951 (дата звернення 24.11.2024 р.)
3. Мельниченко О.І. Аналіз стану забезпечення безпеки на автомобільному транспорті/ О.І. Мельниченко, Ю.М. Магомаєв // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.:НТУ, 2017. – Вип. 1 (37). С. 275-281.
4. Антощенко Р.В. Вплив технічного стану рухомого складу та особистих якостей водіїв на аварійність автомобільного транспорту в Україні/ Р. В. Антощенко, І. А.

Черепньов//Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація» – 2022. С.13-16.

5. Каращук В.О. Аналіз аварійності на автомобільному транспорті з метою пошуку можливостей підвищення його безпеки/В.О. Каращук, О.В. Клецька, О.В. Джус, М.А. Гладченко, С.В. Романовська// Наука та виробництво: міжвуз. Темат.Зб.наук. пр. Вип. 28/ДВНЗ “ПДТУ”.- Маріуполь, ПДТУ, 2024. - С. 92-101. <https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318376> <http://sap.pstu.edu/article/view/318376>

6. Karaschuk V., Determination of safety criteria when choosing the type of transport for transportation of cargo/ V. Karaschuk, O. Dzhus, A. Falendysh, H. Maslak, O. Kletska // MATEC Web Conf. Volume 390, 2024 3rd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2023) Article Number 02011 Number of page(s) 6. Section Interoperability, Safety and Certification in Transport. Environmental Safety in Transport. Barrier-Free Access to Transport Infrastructure <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002011> Published online 24 January 2024 MATEC Web of Conferences 390, 02011 (2024) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439002011>

7. Каращук В.О. Безпека перевезень, як фактор впливу на конкурентоспроможність транспортних послуг/В.О. Каращук // Управління та адміністрування в умовах протидії гібридним загрозам національній безпеці: Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 22 листопада 2023 року). Київ: ДУІТ, ХНУРЕ, МНТУ. 2023. С. 191-193. https://files.duit.edu.ua/uploads/%D0%A1%D0%B0%D0%B9%D1%82/3_%D0%9D%D0%90%D0%A3%D0%9A%D0%90/conferences/international-scientific-and-practical-conferences/hybrid-threats-23-11-2023.pdf

8. Каращук В.О. Вплив інноваційних технологій на стан аварійності на транспорті/ В.О., Каращук, О.В. Джус// Вплив інновацій на розвиток судової експертизи: від традиційних методів до цифрової трансформації: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Львів, 26 квітня 2024 року) / Укладачі: Зелінська М.Б., Хомич Н.П., Грицишин П.М., Чабанюк О.М. – Л.: ЛНДІСЕ МЮ України, 2024. С. 85-90.

9. Статистика ДТП в Україні за 2017 – 2023 р.р. Електронний ресурс: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/>(дата звернення 10.11.2024 р.).

Karashchuk V. O., Ivanchenko D.A., Kiritseva O.V., Djus O.V.

RESEARCH ON ROAD TRANSPORT ACCIDENTS FROM THE ASPECT OF SOCIAL SAFETY

This paper presents a comprehensive study of road traffic accidents involving motor vehicles in the context of social safety. The research analyzes statistical data on traffic accidents with casualties in Ukraine over a seven-year period from 2017 to 2023. The dynamics of accidents involving injuries and fatalities were examined, and the average annual number of accidents, injured individuals, and fatalities were calculated. Based on the analysis, diagrams were developed to illustrate the percentage distribution of traffic accidents by type on an annual average basis.

The results show that 41% of all accidents with casualties are collisions, accounting for 50% of all injuries on average per year. The highest share of fatalities—35%—is observed in accidents involving pedestrian collisions. Consequently, vehicle collisions and pedestrian impacts are identified as the types of traffic accidents that result in the highest annual number of casualties and deaths. The study also investigates the degree of correlation between the type of traffic accident and the number of injured and deceased individuals. The linear correlation coefficient was calculated,

and scatter plots and regression lines were constructed to visualize the relationships among the key parameters.

To forecast accident rates, the authors propose the development of a mathematical model that considers the interdependence between the type of traffic accident and the resulting number of casualties and fatalities. Such a model enables analytical assessment, risk forecasting, and informed decision-making in the field of road safety. The practical implementation of the research findings will improve the effectiveness of technical, organizational, and economic measures aimed at preventing road traffic accidents and mitigating their severe consequences. The proposed approaches can be applied to improve transport safety management systems and are relevant to public authorities, local governments, insurance companies, and civil society organizations interested in enhancing social safety on Ukrainian roads.

Keywords: road transport, accident rate, road accidents, injured, dead, social security.

Стаття надійшла 28.04.2025р.

УДК 656.13

doi.org/10.31498/2522-9990292025330276

Шумляківський В.П., Чуйко С.П., Прохорчук М.В.

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ НА ПЕРЕХРЕСТЯХ З ОРГАНІЗАЦІЄЮ ПОФАЗОВОГО РОЗ'ЇЗДУ МЕТОДОМ РОЗЦЕПЛЕНОЇ ФАЗИ

В статті розглянуто проблеми безпеки руху на перехрестях, облаштованих світлофорним регулюванням, де час дозволеного сигналу по одній вулиці може мати різну тривалість на підходах на перехресті. Даний спосіб організації пофазового роз'їзду є ефективним у випадках, коли є значна різниця між інтенсивністю руху на підходах до перехрестя, та геометрія проїзної частини не дає можливості введення третьої фази для організації повороту ліворуч. Також ефективно даний метод сприяє зменшенню затримок в русі на перехресті габаритних автобусів та тролейбусів, що повертають ліворуч. В статті зазначено такого загальновідомого недоліку даного метода, як відсутність інформації у водіїв стосовно сигналу світлофора на зустрічних смугах. Проведено аналіз аварійності на перехрестях з організацією пофазового роз'їзду методом розщепленої фази в м. Житомир. Приведені статистичні дані, надані Управлінням патрульної поліції України в м. Житомир, стосовно дорожньо-транспортних пригод з потерпілими і загиблими, що сталися на досліджувальних перехрестях, дані про ДТП з матеріальним збитком, отримані з відкритих джерел, зокрема Житомир.інфо. Узагальнено результати опитування водіїв-професіоналів стосовно їх думки, щодо необхідності підвищення інформативності. В опитуванні прийняли участь водії тролейбусів та автобусів трамвайно-тролейбусного управління м. Житомир, та водії вантажівок підприємств ПП «Юмакс» і ПП «Гладкій» м. Житомир. Узагальнені дані опитування свідчать про необхідність введення додаткових інформаційних пристроїв для того, щоб позначати, перехрестя на яких час дозволеного сигналу, неоднаковий для різних напрямків. Як вирішення проблеми підвищення інформативності на перехрестях з організацією пофазового роз'їзду методом розщепленої фази, запропоновано введення статичного знаку, що встановлюватиметься на підходах до перехрестя та використання динамічних табло, які б дублювали сигнали світлофорів на зустрічній смузі.

Ключові слова: світлофорне регулювання, розщеплена фаза, аварійність, ДТП, несинхронна робота світлофора, фази регулювання, цикл світлофора, інформативність, перехрестя.

Постановка проблеми. Перехрестя є найважливішою частиною вулично-дорожньої мережі міста. Саме від роботи перехрестя залежить ефективне функціонування вулично-дорожньої мережі. Методи організації дорожнього руху на перехрестях мають бути спрямовані на облаштування безпечних умов перетину для всіх учасників дорожнього руху, а також на зменшення затримок в русі при проїзді перехрестя, бо затримки призводять до економічних витрат та збільшення шкідливих викидів. [1]. Тож наразі є важливим постійний моніторинг проблем організації дорожнього руху на перехрестях та розробка методів їх усунення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для організації безпечного руху на перехресті найчастіше використовують світлофорне регулювання. Введення світлофорного регулювання є доцільним при певному співвідношенні інтенсивності руху по головній та другорядній дорогах. Світлофорне регулювання мінімізує кількість конфліктних точок, сприяє скороченню затримок учасників дорожнього руху, зменшенню негативного впливу на довкілля.

Важливим етапом введення світлофорного регулювання є визначення кількості фаз регулювання. Максимальна кількість фаз забезпечує мінімум конфліктних точок для регульованих напрямків, однак збільшує тривалість циклу і сумарну тривалість додаткових тактів. Тому при визначенні кількості фаз слід враховувати конкретні умови, що склалися на перехресті (кількість і тип конфліктних точок, обсяг руху, геометрію перехрестя, тощо) [1].

Найпростішим є двофазний цикл світлофорного регулювання. При застосуванні двофазного циклу лівоповоротні маневри здійснюються в конфлікті з прямим напрямком, тож при певній інтенсивності можуть виникати значні затримки в русі лівоповоротного напрямку.

В літературі [1, 2] регламентовано доцільність введення третьої фази при інтенсивності лівоповоротного напрямку від 120 од/год. Однак при недостатній ширині проїзної частини, або якщо інтенсивність руху в зустрічних напрямках значно відрізняється, вдаються до введення розщепленої фази, що дає час транспортним засобам зробити поворот ліворуч при великій інтенсивності зустрічного руху. Існує два методи розщеплення фази: метод затримки старту і метод ранньої відсічки. Пофазовий роз'їзд при застосуванні даних методів наведено на рисунках 1,2.

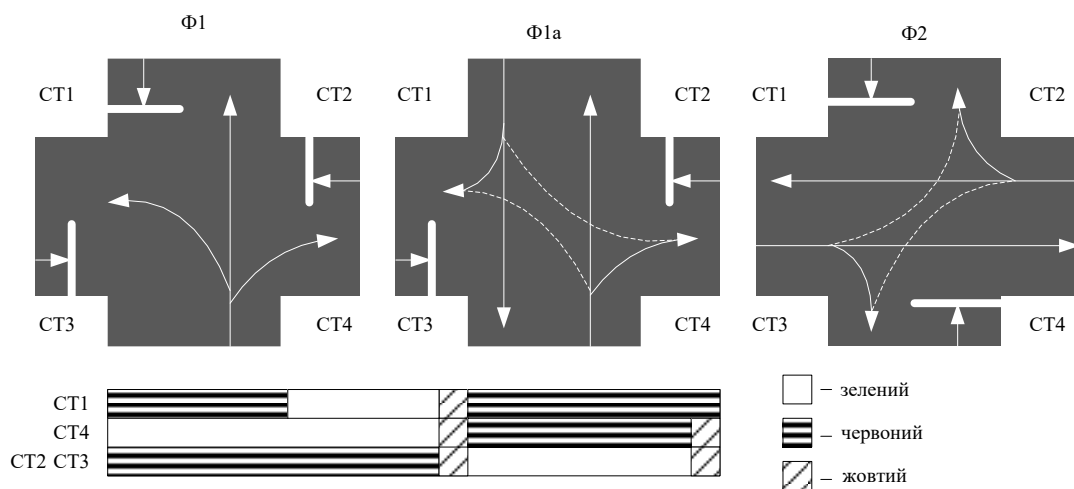


Рисунок 1 – Пофазовий роз'їзд транспортних засобів з використанням розщепленої фази методом затримки старту

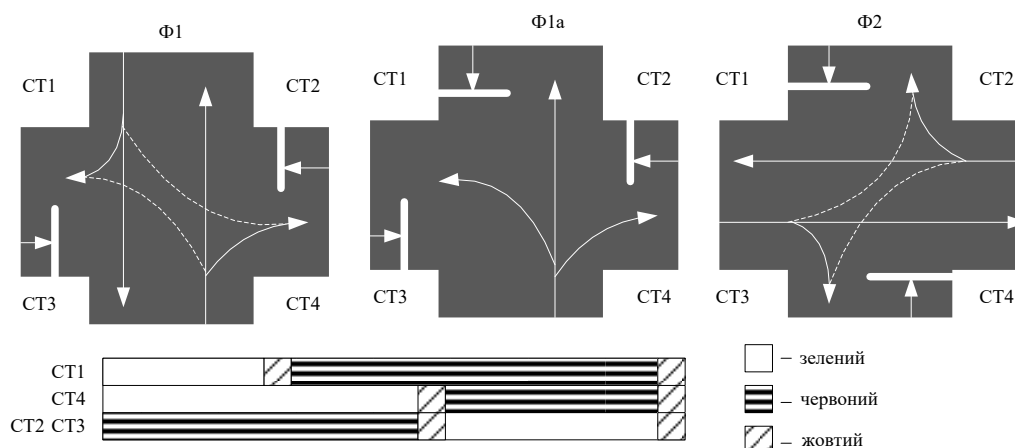


Рисунок 2 – Пофазний роз'їзд транспортних засобів з використанням розщепленої фази методом ранньої відсічки

Значним недоліком даного методу вважається відсутність у водіїв інформації про сигнал світлофора на зустрічній смузі [1]. Тому об'єктом дослідження статті є перехрестя м. Житомир, на яких організовано пофазовий роз'їзд з використанням метода розщепленої фази. Метою дослідження є аналіз аварійності на заданому перехресті та розробка пропозицій щодо усунення недоліків даного методу.

Мета дослідження. Метою роботи є аналіз роботи перехрестя з організацією пофазового роз'їзду методом розщепленої фази та розробка засобів підвищення інформативності для водіїв.

Основний матеріал дослідження. Метод розщепленої фази використовується при двофазному циклі, фактично третьої фази в циклі не має, а існує фазоподібний елемент. При застосуванні двофазного циклу ліво-і правоповоротні маневри, а також рух пішоходів здійснюється за наявності конфліктів. [1]. Використання розщепленої фази при двофазовому циклі не міняє цю ситуацію, конфлікти лишаються при здійсненні поворотів. Конфліктні точки на перехресті при застосуванні двофазного циклу вказані на рисунку 3.

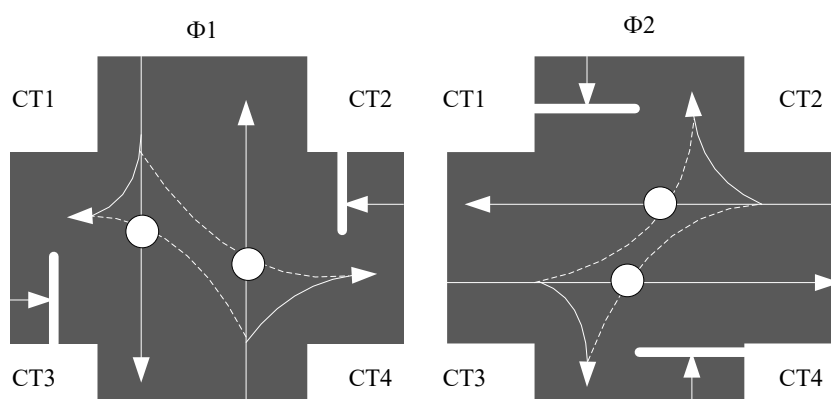


Рисунок 3 – Конфліктні точки при двофазному циклі світлофорного регулювання

При застосуванні розщепленої фази методом ранньої відсічки, в фазі 1а (рисунок 2 Ф1а) конфліктів має не бути, бо рух дозволено тільки в одному напрямку. Але в деяких випадках може складатися наступна ситуація: водії, які здійснюють поворот ліворуч (напрямок АВ рисунок 4), з напрямку, на якому час дії зеленого сигналу скорочено (переріз А рисунок 4), вже виїхали на середину перехрестя, але не встигли завершити маневр на зелений сигнал, бачачи

жовтий сигнал для себе, намагаються швидше завершити маневр. Не маючи інформації про те, що на зустрічній смузі ще діє зелений сигнал, і рух транспортних засобів дозволено в усіх напрямках, водій в такій ситуації може здійснити швидкий маневр, не давши дорогу зустрічному транспорту, який рухатиметься прямо на зелений сигнал, тим самим спричинивши ДТП.

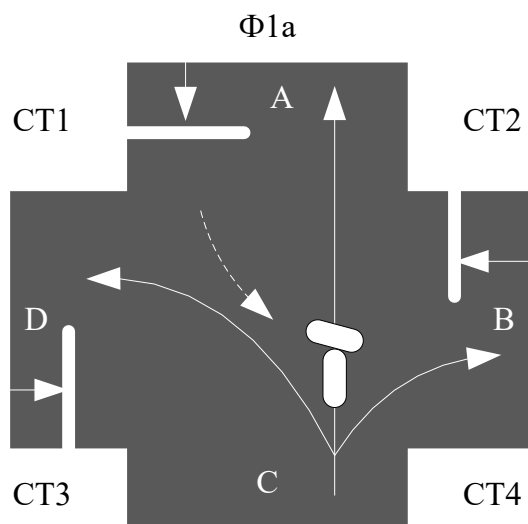


Рисунок 4 – Схема імовірного ДТП

За даними Житомирської міської ради, організація пофазового роз'їзду з використанням методу розщепленої фази використовується на перехрестях вулиць Велика Бердичівська та Шевченка, Велика Бердичівська та Жуйка, Київська та Небесної Сотні, Східна та Незалежності. На даних перехрестях організовано пофазовий роз'їзд методом ранньої відсічки. На рисунку 5 надано схему одного з перехресть, інші мають аналогічні геометричні параметри.

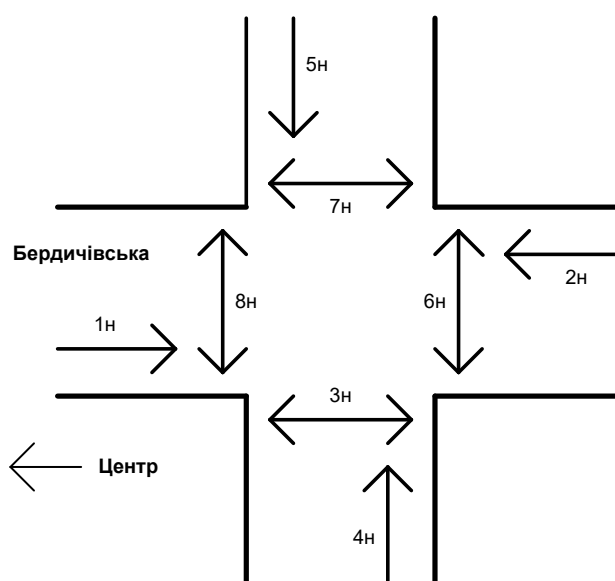


Рисунок 5 – Схема руху автомобілів та пішоходів через перехрестя вулиць В. Бердичівська та Жуйка

Транспортні технології

Циклограму роботи світлофорної сигналізації наведено на рисунку 6. В першій фазі регулювання дозволений сигнал подовжено в напрямку 2 для того, щоб лівоповоротний напрямок встиг завершити маневр.

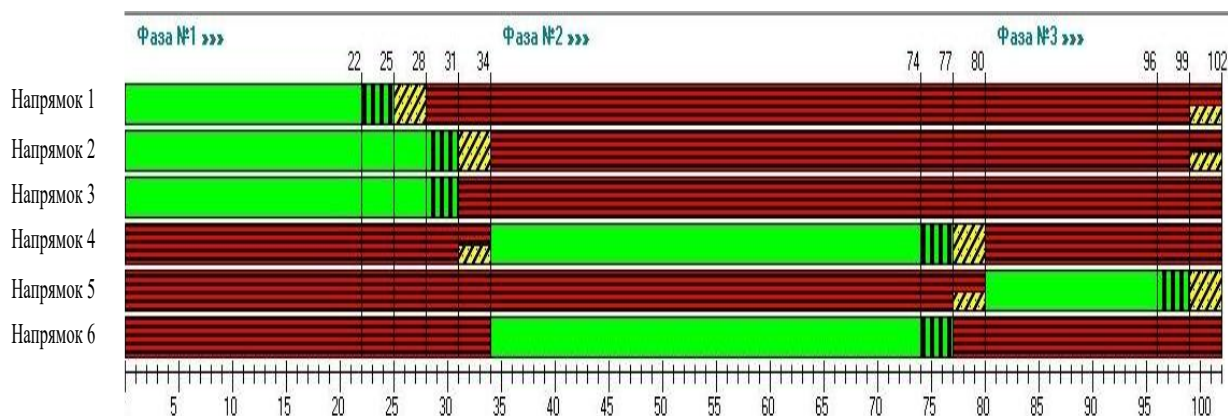


Рисунок 6 – Циклограма роботи світлофорної сигналізації на перехресті вулиць В. Бердичівська і Шевченка

Згідно інформації, наданої Управлінням патрульної поліції на досліджувальних перехрестях за період 10 місяців 2024 року, сталась наступна кількість ДТП за схемою наданою на рисунку 4: Велика Бердичівська та Шевченка – 3; Велика Бердичівська та Жуйка – 2; Київська та Небесної Сотні -2; Східна та Незалежності – 3. З відкритих джерел, зокрема Житомир. інфо, також знайдено випадки ДТП , зокрема по перехрестях Велика Бердичівська та Шевченка – 4; Велика Бердичівська та Жуйка – 5; Київська та Небесної Сотні -4; Східна та Незалежності – 3.

Також люди лишають скарги на несинхронну роботу світлофора, на Житмир.інфо є скарги в коментарях до ДТП, безпосередньо на роботу світлофора на перехресті В.Бердичівська –Жуйка.

Згідно наведеної статистики, можна зробити висновок, що неінформованість водіїв про сигнал світлофору на зустрічній смузі може призводити до ДТП.

Виходячи з твердження, що водій є керуючою ланкою в системі дорожнього руху транспортних засобів, яка конкретно визначає напрямку і швидкість транспортних засобів у кожен момент руху автомобіля. Чим повніше і чіткіше налагоджено інформування водіїв про умови і необхідні режими руху, тим більш точними і безпомилковими є керуючі дії водіїв, а отже, тим вищий рівень безпеки та ефективності дорожнього руху [3]. Було проведено опитування водіїв-професіоналів з приводу організації пофазового роз'їзду, організованого методом розщемленої фази. Водіям було запропоновано відповісти на два питання і були варіанти відповіді Перед опитуванням було наведено коротке пояснення проблеми, що досліджується: «Існує певна організація роботи світлофорного регулювання, при якій світлофори по одній дорозі працюють не синхронно в різних напрямках. В одному напрямку може бути подовжене зелене світло, а в іншому напрямку - скорочене. Зазвичай така організація роботи світлофорів застосовується для того, щоб надати можливість транспортним засобам повернути ліворуч і є ефективною в багатьох випадках. Однак недоліком цієї організації є те, що водії не інформовані про сигнал світлофора на зустрічній смузі. Надайте, будь ласка, відповіді на питання стосовно даної організації роботи світлофорного об'єкта», і потім було надано два питання:

Транспортні технології

1. Чи вважаєте Ви, що несинхронна робота світлофорів може призвести до ДТП? Варіанти відповіді «Так», «Ні», «Свій варіант»

2. Чи є необхідність в підвищенні інформативності для водіїв на перехрестях де світлофори працюють несинхронно. Варіанти відповіді «Так», «Ні», «Свій варіант»

В опитуванні прийняли участь водії вантажівок підприємств в ПП «Юмакс» і ПП «Гладкій» і водії тролейбусів та автобусів трамвайно-тролейбусного управління м. Житомир. В опитування прийняли участь 23 водія вантажних автомобілів. З першим питанням погодились 75% опитаних, 25 відсотків не вважають можливим виникнення аварійної ситуації.

Чи вважаєте Ви, що несинхронна робота світлофорів може призвести до ДТП?

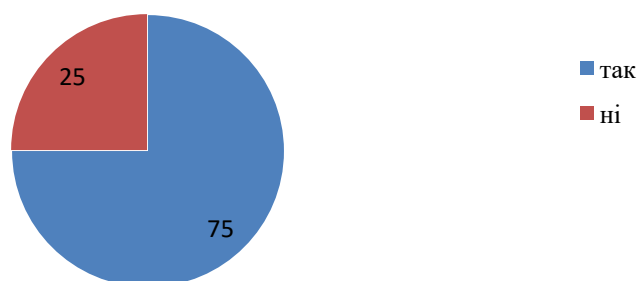


Рисунок 7 – Результати опитування водіїв вантажних автомобілів стосовно можливості виникнення ДТП через несинхронну роботу світлофорів

Стосовно другого питання необхідність підвищити інформативність на перехрестях вважають необхідним 90% опитаних.

Чи є необхідність в підвищенні інформативності для водіїв на перехрестях, де світлофори працюють несинхронно

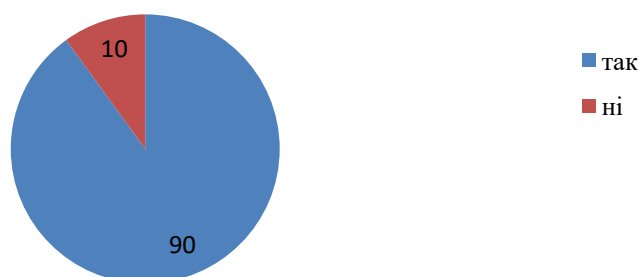


Рисунок 8 – Результати опитування водіїв вантажних автомобілів стосовно підвищення інформативності на перехрестях де пофазовий роз'їзд організовано методом розщепленої фази

Транспортні технології

Схожі результати було отримано серед водіїв автобусів і тролейбусів. Всього в опитування прийняли участь 40 водіїв. Стосовно першого питання 56 відсотків погодились з можливістю виникнення ДТП, 35 відсотків не погодились і 9% дали свою відповідь

Чи вважаєте Ви, що несинхронна робота світлофорів може призвести до ДТП?

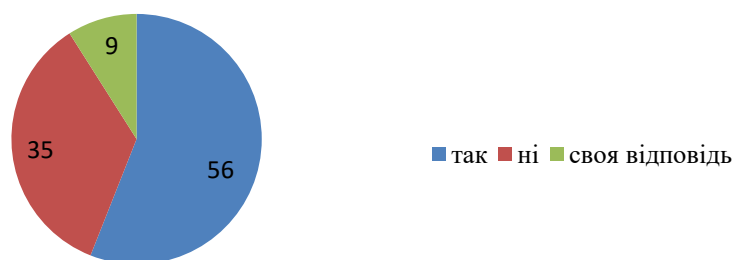


Рисунок 9 - Результати опитування водіїв тролейбусів та автобусів стосовно можливості виникнення ДТП через несинхронну роботу світлофорів

Стосовно другого питання, 80% відсотків водіїв погодились, що необхідно підвищувати рівень інформативності на перехрестях де організовано пофазового роз'їзду методом розщепленої фази. 15% респондентів не бачать в цьому потреби, 5 відсотків надали свій варіант відповіді, зокрема внесли пропозицію про необхідність інформування водіїв про сигнал світлофора на зустрічній смузі.

Чи є необхідність в підвищенні інформативності для водіїв на перехрестях, де світлофори працюють несинхронно

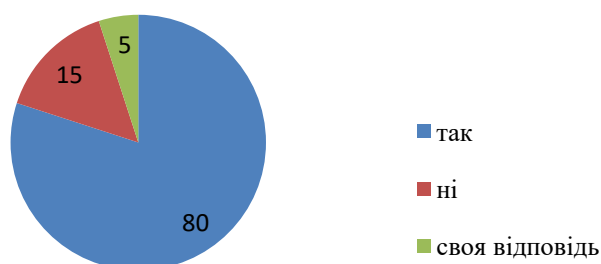


Рисунок 10 – Результати опитування водіїв автобусів стосовна підвищення інформативності на перехрестях, де пофазовий роз'їзд організовано методом розщепленої фази

ВИСНОВКИ

Незважаючи на виявлені недоліки, розщеплення фаз має перевагу перед використанням простого двофазного циклу у тих випадках, коли спостерігається неоднорідна інтенсивність руху в різних напрямках, і частина транспортних засобів, що рухаються через перехрестя, не встигає зробити лівий поворот (як, наприклад, на малюнку 4 напрямом CD), а облаштування

поворотної секції не можливо через геометричні особливості проїзної частини. Також метод розщеплення фаз є ефективним за наявності напрямків регулювання руху трамваїв і тролейбусів, що, зокрема, дає змогу знизити затримки трамваїв удвічі та оптимізувати співвідношення між тривалістю дозволених сигналів конфліктних транспортних та пішохідних напрямків регулювання. У результаті це зумовлює збільшення середнього відношення тривалості дозвільного сигналу до циклу регулювання на 6 % [2].

Тому відкидати даний спосіб організації пофазного роз'їзду не варто, але з метою підвищення безпеки руху на перехрестях з розщепленими фазами варто ввести інформаційні знаки, які б привертали увагу водіїв при наближенні до перехрестя з такою організацією світлофорного регулювання. Також можливо встановлення сферичних дзеркал, які відображали б сигнальну групу смуги для зустрічного транспорту, або інформаційних табло, які б дублювали сигнали світлофорів на зустрічній смузі.

Список використаних джерел

1. Поліщук В.П. Організація та регулювання дорожнього руху. – К.: Знання України, 2014. – 467 с.
2. Управління дорожнім рухом на регульованих перехрестях у містах: монографія/ С.Ю.Формальчик, І.А.Могила В.Е.,Трушевський, В.В. Гілевич; за заг.ред С.Ю.Формальчика.– Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018. – 236
3. Організація дорожнього руху : навчальний посібник /А.А.Кашканов,В. П.Кужель.– Вінниця: ВНТУ,2017.–125с.
4. Прохорчук М. Проблемні аспекти організації пофазного роз'їзду транспортних засобів з використанням розщепленої фази. Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем Зб. матеріалів п'ятої Всеукраїнської наук-техніч. інтернет-конф. 25-27 жовтня 2023 року, м. Рівне с 133-134

Shumlyakivskyi V. P. Chuyko, S.P., Prokhorchuk M

IMPROVEMENT OF TRAFFIC SAFETY AT INTERSECTIONS WITH THE ORGANIZATION OF A SPLIT-PHASE METHOD

The article deals with the problems of traffic safety at intersections equipped with traffic signal control, where the time of the permitted signal on one street may have different duration on the approaches to the intersection. This method of organizing a phased junction is effective in cases where there is a significant difference between the traffic intensity on the approaches to the intersection, and the geometry of the roadway does not allow the introduction of a third phase for organizing left turns. This method is also effective in reducing traffic delays at the intersection of large buses and trolleybuses turning left. The article points out such a well-known drawback of this method as the lack of information from drivers about traffic signals in the oncoming lanes. An analysis of the accident rate at intersections with the organization of a split-phase junction in Zhytomyr is carried out. The article presents statistical data provided by the Office of the Patrol Police of Ukraine in Zhytomyr regarding road accidents with victims and fatalities that occurred at the studied intersections, data on road accidents with material damage obtained from open sources, in particular Zhytomyr.info. The results of a survey of professional drivers on their opinion about the need to improve information are summarized. The survey involved drivers of trolleybuses and buses

of the Zhytomyr Tram and Trolleybus Department and truck drivers of the companies Humax and Gladkiy in Zhytomyr. Zhytomyr. The generalized survey data indicate the need to introduce additional information devices to indicate the intersections where the permitted signal time is different for different directions. As a solution to the problem of increasing the information content at intersections with the organization of a split-phase crossing, it is proposed to introduce a static sign to be installed on the approaches to the intersection and the use of dynamic boards that would duplicate the signals of traffic lights on the oncoming lane.

Keywords: *traffic light control, split phase, accident rate, road accidents, asynchronous operation of traffic lights, control phases, traffic light cycle, information content, intersection.*

Стаття надійшла 16.05.2025р.

Новини України та світу

20 НОВИХ ВИДІВ ПРОДУКЦІЇ МЕТАЛУРГІЇ ПОЧАТИ ВИПУСКАТИ ПІДПРИЄМСТВА «МЕТІНВЕСТУ» У 2024-МУ

Металургійні підприємства групи «Метінвест» в Україні у 2024 році почали випускати 20 нових видів продукції. Зокрема, зі спільним підприємством — комбінатом «Запоріжсталь» — вони випустили 6 нових продуктів.

Про це повідомила прес-служба «Метінвесту».

Як зазначила компанія, з 2014 року їй вдалося налагодити випуск 422 видів нової продукції. У 2024 році найбільше нових продуктів освоєно в сегменті:

- сортового прокату — 12;
- холоднокатаного рулонного та листового прокату — 4;
- гарячекатаного рулонного й листового прокату — 2;
- оцинкованого рулонного прокату та напівфабрикатів — по одному.

За словами «Метінвесту», лівова частка нової продукції припала на комбінати «Каметсталь» та «Запоріжсталь». Ще один новий продукт освоїв виробник оцинкованого прокату «Юністіл».

Усю нову сортову продукцію розпочали випускати на «Каметсталі». Зокрема, комбінат освоїв виробництво:

арматурного прокату для залізобетонних конструкцій: 2 нових типорозмірів та нового класу міцності за українським національним стандартом ДСТУ 3760. Також він освоїв виробництво арматури за польськими технічними нормами;

6 видів катанки з різних марок сталі та різних розмірів за українським, міжнародним, європейським та американським стандартами;

гарячекатаного профілю для кріплення гірничих виробок типу СВП33 за українськими стандартами;

круглого прокату зі сталі СтЗпс діаметром 27 мм за українськими стандартами, що використовується в будівництві та машинобудуванні.

Компанія зазначила, що комбінат «Запоріжсталь» налагодив випуск 4 продуктів, зокрема Рулон марки S250GD, які виготовлені за українським та європейським стандартами.

Сталевий прокат марки S215G, придатний для виробництва незамкнених та зварних металевих профілів, листів, тримальних, допоміжних і декоративних конструкційних елементів. Випускається за стандартом Німеччини DIN 1623-2.

Рулон марки DC01 завтовшки 2,5 мм, що відповідає європейським стандартам EN 10130 та EN 10131.

Різаний із холоднокатаних рулонів лист товщиною 2,1-2,5 мм широкого маркового складу.

За словами «Метінвесту», уся ця продукція призначена для будівельної галузі, машинобудування, сегменту металовиробів.

Цього року комбінат «Запоріжсталь» розпочав виробництво 2 видів гарячекатаного прокату. Це, зокрема, рулон і лист марок S355JR/ S355J2 завтовшки 2,75-2,79 мм за євро стандартами. А також лист у новому розмірі 5,0x1500x6000 мм зі сталі 09Г2/09Г2С за українськими технічними нормами.

Компанія зазначила, що така продукція має попит у будівельній та машинобудівній галузях.

«Юністіл» освоїв випуск оцинкованого прокату марок S250GD-S280GD із рулонної сировини від комбінату «Запоріжсталь». Ці марки сталі застосовують у будівництві, зокрема в конструкціях, які потребують поєднання міцності й корозійної стійкості.

«Каметсталь» налагодив випуск безперервнолитих квадратних заготовок, які відповідають підвищеним стандартам якості як щодо хімічного складу матеріалу, так і щодо фізичної структури після кристалізації.

За словами компанії, такі напівфабрикати призначені для виготовлення сортового та фасонного прокату відповідального застосування.

<https://thepage.ua/ua/news/pidpriyemstva-metinvestu-vipustili-20-novih-vidiv-produkciyi-u-2024-mu>

УКРАЇНА ВПЕРШЕ ЕКСПОРТУВАЛА БІОМЕТАН ЧЕРЕЗ ТРУБОПРОВІД ДО ЄВРОПИ: ЩО БУДЕ ДАЛІ

Україна вперше почала експортувати біометан через трубопровід. Перша партія до Європи перетнула український митний кордон 6 лютого 2025-го. Про це повідомили в Енергетичній митниці України.

Як Україна почала експортувати біометан

Протягом двох років Україна проводила роботу, щоб внести зміни до законодавства України, пов'язані з митним контролем та митним оформленням біометану.

6 лютого 2025- року Енергетична митниця успішно оформила періодичну декларацію на переміщення через митний кордон України першої партії біометану для експорту до Європи через трубопровід.

В Енергетичній митниці пояснили, чому це важливо для України:

Біометан – це екологічно чисте паливо, яке може замінити природний газ і зменшити викиди CO₂.

Трубопровідний експорт біометану відкриває нові перспективи для стабільного постачання екологічно чистого газу до Європи.

Українські виробники показують, що країна готова бути ключовим гравцем на європейському ринку відновлюваних енергоносіїв.

Такий експорт відкриває нові можливості для агросектору та інвесторів у сфері біоенергетики, оскільки біометан виробляється з органічних відходів, що стимулює розвиток сільського господарства.

«Це не просто важливий крок у розвитку зеленої енергетики та зміцненні енергетичної безпеки регіону. Це значний прорив для України на шляху до енергетичної незалежності та європейської інтеграції», – зазначили у митниці.

Окрім цього, Україна має великий потенціал для виробництва біометану та може бути важливим постачальником зеленої енергії на європейському ринку, йдеться у повідомленні митниці.

<https://thepage.ua/ua/news/ukrayina-vpershe-eksportovala-biometan-cherez-truboprovid-do-yevropi>

ВИМОГИ ДО ПУБЛІКАЦІЙ

До відома авторів,
які надсилають статті у міжвузівський тематичний
збірник наукових праць «Наука та виробництво»

У збірнику публікуються статті за наступними напрямками:

1. Машинобудування і зварювальне виробництво.
2. Будівництво та архітектура.
3. Біоінженерія.
4. Металургія.
5. Інформаційні технології.
6. Ремонт та відновлення деталей машин.
7. Матеріалознавство.
8. Транспортні технології.
9. Енергетичні системи та обладнання.
10. Економіка та управління підприємствами.
11. Екологічна безпека.

Усі статті повинні відповідати вимогам Постанови Президії ВАК України №7-05/1 від 15.01.2003. Вартість публікації однієї статті в збірнику 45 грн. аркуш в разі дотримання авторами таких вимог до оформлення:

- текст статті набирається на комп'ютері в текстовому редакторі Microsoft Word (шрифт 12-й Times New Roman, міжрядковий інтервал 1,0; поля: верхнє і нижнє – по 20 мм, бічні – по 20 мм);
- ілюстративний матеріал монтується в текст. Креслення і графіки виконуються в будь-якому графічному редакторі. Ілюстративний матеріал повинен бути придатний для безпосереднього відтворення розмножувальними пристроями;
- підписи під рисунками і перелік посилань оформляються відповідно до стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1:2006;
- на першій сторінці статті напівжирним шрифтом набираються: класифікаційний індекс УДК – у лівому верхньому куті; прізвища та ініціали авторів – на один рядок нижче, у правому верхньому куті; назва статті – посередині сторінки (великими літерами);
- анотації додаються двома мовами (обсяг анотації українською мовою не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова; для статей не українською мовою обсяг анотації українською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), першою наводиться анотація на мові статті (відступ зліва і справа по 1 см, курсивом) та ключові слова (від трьох до восьми). Анотації, що надруковані іншими мовами розташовуються у наприкінці статті;
- на останній сторінці статті після переліку посилань у правому нижньому куті курсивом друкується «Стаття надійшла...» і проставляється дата подання статті у редколегію. У лівому нижньому куті друкується «Рецензент: д-р техн. наук ...» і П.І.Б. Рецензента.

Редакція звертається до авторів з проханням при підготовці статей враховувати вимоги, в відповідності з яким, стаття повинна містити такі необхідні елементи, як:

- постановка проблеми в узагальненому вигляді і її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями;
- аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спираються автори виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячена означена стаття;
- формулювання цілей статті (постановка завдання);

- виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

Увага! Зазначені елементи статті повинні бути виділені відповідними заголовками: **Постановка проблеми; Аналіз останніх досліджень і публікацій; Мета (завдання) дослідження; Основний матеріал дослідження; Висновки.**

Статті подаються в двох примірниках (з яких один повинен бути першим, видрукованим на лазерному принтері) **на одному боці аркуша формату А4. До рукопису статті додаються:**

- експертний висновок про можливість опублікування у відкритому друці;
- рецензія доктора технічних наук, у якій повинна бути відбита наукова новизна результатів, їх цінність і значимість;
- рекомендація кафедри чи організації, що представляє дану статтю до публікації;
- анотації російською, українською, англійською мовами з ключовими словами;
- відомості про авторів: прізвище, ім'я, по батькові, учений ступінь, звання, місце роботи, посада, адреса, робочий телефон.

До перерахованих матеріалів необхідно додавати CDз текстом статті (Word 2010 або формат **.rtf**).

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ CD

- експертний висновок про можливість опублікування –*файл* **expert.doc**;
- рецензія доктора технічних наук –*файл* **recenz.doc**;
- рекомендація кафедри чи організації –*файл* **recomend.doc**;
- відомості про авторів –*файл* **sved_avt.doc**;
- анотація українською, англійською мовою –*файл* **an.doc**;
- текст статті –*файл* **article.doc**;

Ініціали і прізвища авторів, вчені ступені, назва організації, місто, країна, назва, анотація статті та ключові слова наводяться, **українською, англійською мовами.**

Повністю оформлені статті та додані до них матеріали надсилаються в редакцію збірника на адресу: 87500, Україна, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, ДВНЗ «ПДТУ». *Фактичне місце розміщення:* Україна, м. Дніпро, вул. Гоголя, 29, ауд. 314. Приймання статей проводить відповідальний секретар редколегії збірника, канд. техн. наук, ст. доцент кафедри Зварювання та споріднені технології, **Зусін Антон Михайлович.**

E-mail: zusin_a_m@pstu.edu Тел. +38(097)477-54-93.

Підписано до друку 01.06.2025 р.
Папір тип №2. Умов. друк. ар. 10,69. Тираж 400. Формат 60х84 1/8.
Замовлення №110. Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу.
Ціна договірна.