

9. **Паргон В.З., Черепанов Г.П.** Механика разрушения // Механика в СССР за 50 лет. - М.: Наука, 1972. - Т.3. - 221 с.
10. **Кузнецов В.М.** Математические модели взрывного дела. - Новосибирск: Наука, 1977. - 259 с.
11. **Рижов П.А.** Математическая статистика в горном деле. - М.: Высшая школа, 1973. - 286 с.
12. **Griffith A.A.** The phenomenon of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. A 221, 1920, pp.1201-1206.
13. **Григорян С.С.** Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // ПММ, 1967. - Т.31. - С.157-245

Рукопис подано до редакції 18.11.2021

УДК 622.647.21

Л.І. ЄФІМЕНКО, М.П. ТИХАНСЬКИЙ, кандидати техн. наук, доценти,
А.М.ТИХАНСЬКА, асист., Криворізький національний університет

АДАПТИВНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА ЗА КРИТЕРІЄМ ЗНИЖЕННЯ МЕТАЛОЄМНОСТІ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета. Дослідження навантаження на конструкції конвеєра в екстремальних ситуаціях з метою зниження їх дії, зменшення енерговитрат та металоємності опорних конструкцій за рахунок впровадження адаптивної системи керування швидкістю стрічкового конвеєра.

Методи дослідження. Методи, які використовуються у дослідженні, розроблені в теорії автоматичного керування, обробки випадкових процесів. Також використано наукове узагальнення раніше виконаних досліджень при аналізі літературних і патентних джерел.

Наукова новизна. Пропонується адаптивне керування швидкістю стрічкового конвеєра з врахуванням зміни навантаження на опорні конструкції конвеєра, що проявляється у випадку транспортування вантажопотоку з великими шматками гірничої маси (до 500 мм). Підвищення економічної ефективності досягається за рахунок зменшення енергоспоживання та навантаження на опорні конструкції, що дозволяє знизити їх металоємність.

Керування відбувається за рахунок узгодження режимів транспортування та фактичного вантажопотоку при відсутності повної апріорної (такої, що відома наперед) інформації про гранулометричний склад потоку сировини, зовнішні збурення і граничні умови, тобто адаптивній системі притаманна невизначеність.

Практична значимість. Сучасні конвеєрні лінії мають велику протяжність, тому зменшення навантаження на опорні конструкції дозволяє знизити їх металоємність на 25 – 30%. Вдосконалення експлуатації довгих конвеєрів потребує розробки систем, що оптимізують режим їх роботи за критерієм мінімуму навантаження на опорні конструкції при транспортуванні корисних копалин.

Адаптивне керування стрічковим конвеєром за рахунок регулювання швидкості робочого органу конвеєра з врахуванням параметрів, які постійно змінюються, дозволяє підвищити ефективність роботи виробництва та зменшити металоємність.

Авторами запропоновані принципи побудови автоматизованої системи конвеєра, що відрізняються тим, що враховуються як поточний, так і прогнозований стан вантажопотоку. Своєчасне виявлення зміни гранскладу вантажопотоку дозволяє швидко реагувати на нову інформацію та корегувати управляючі впливи шляхом впровадження адаптивного регулятора.

Результати. Запропоновано впровадження адаптивних системи керування швидкістю стрічкового конвеєра за критерієм зниження металоємності опорних конструкцій, що дозволяють враховувати збурюючі впливи на опори зумовлені зміною складу вантажопотоку, це зменшує навантаження на них та дозволяє зменшити металоємність.

Ключові слова: адаптивне керування, стрічковий конвеєр, металоємність, вантажопотік, динамічне навантаження, автоматична система керування.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-136-140

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Виходячи з особливостей розрахунку і проектування, а також, враховуючи умови роботи конкретної конструкції, оптимізація металоємності опорних металоконструкцій стрічкового конвеєра має кілька напрямів. До них, в першу чергу, слід віднести завдання розподілу внутрішніх зусиль і матеріалу в статично невизначеній системі із заданою геометричною схемою, задачі визначення оптимальних і фізичних параметрів конструктивної форми системи при заданих навантаженнях. По-друге, сюди відносяться способи автоматичного регулювання режимних параметрів конвеєрних установок, а саме, регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки.

Конвеєрна установка, яка забезпечена регульованим приводом і автоматичною системою керування режимами транспортування, надає можливості враховувати гірничотехнічні параме-

три матеріалів, що транспортують, нерівномірність вантажопотоку, технічні параметри конвеєрів, взаємний вплив цих параметрів один на одного, фактичне завантаження конвеєра, що дозволяє зменшити навантаження на опорні конструкції. Названі фактори передбачають розробку та впровадження адаптивної системи, що при формуванні керуючої дії враховує їх вплив на навантаження конструкцій за рахунок регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки.

При цьому зазначена адаптивна система, що враховує інформацію про вантажопотік, дозволить більш ефективно управляти режимами роботи конвеєрної установки, знижувати навантаження на опорні конструкції конвеєра (став, роликоопори), що в свою чергу впливає на його металоємність.

Аналіз досліджень і публікацій. До сучасних металоконструкцій лінійної частини конвеєра, а саме, конвеєрного ставу пред'являється ряд вимог по міцності, амортизуючій здатності при динамічних навантаженнях, стійкості, мінімальній металоємності, довговічності. Аналіз розрахунків ряду підприємств і науково-дослідних організацій показав, що існуючі методи проектування конвеєрного ставу не повною мірою враховують дійсну картину його навантаження.

Основні розміри конвеєрних ставів призначаються з конструктивних міркувань з залученням галузевих стандартів і нормалей. За прийнятими розмірами проводяться перевірочні розрахунки, які полягають у наступному: вибирається розрахункова схема секції ставу у вигляді рами, зовнішні навантаження задаються у вигляді статично прикладених сил від маси вантажу, стрічки, роликоопори. Крім того, вводиться коефіцієнт перевантаження, величина якого коливається від 1,2 до 1,7 без обґрунтування його величини.

Впровадженням адаптивних систем керування стрічковим конвеєром, які б враховували такі фактори, як: гранулометричний склад вантажу, наявність великих шматків гірничої маси, можливість запуску завантаженого конвеєра (особливо похилого), що формують навантаження опорних конструкцій конвеєра, а саме, ставу та роликоопор займалися недостатньо.

Метою цієї роботи є зменшення металоємності опорних конвеєрних конструкцій та ефективності роботи виробництва за рахунок впровадження адаптивної системи керування, яка враховує при формуванні керуючої дії фактори, що навантажують став автоматизованого конвеєра. Керування відбувається за рахунок сучасного обладнання, що розраховує коефіцієнти налаштування регуляторів з врахуванням факторів, що формують навантаження опорних конструкцій конвеєра.

Таким чином, з'явилася можливість раціонального управління режимом роботи стрічкового конвеєра в залежності від навантаження його опорних конструкцій.

Постановка завдання. Зміна рівня швидкості транспортування, величини натяжного зусилля конвеєрної стрічки, гранулометричного складу вантажу, що транспортується тягне за собою зміну розрахункового навантаження на прогони ставу з боку роликоопор. Спрямоване адаптивне регулювання режимних параметрів, при наявності адаптивних систем керування, дозволяє знижувати навантаження на конструкції в екстремальних ситуаціях, наприклад, при транспортуванні особливо великих шматків вантажу або при запусках завантаженого конвеєра особливо похилого. Це дозволяє зменшити перетин елементів конструкцій без втрати міцності при проектуванні або збільшити довговічність і надійність у діючих конвеєрів.

Таким чином, впровадження адаптивної системи керування транспортуванням корисних копалин є актуальним завданням. Для вирішення цього завдання необхідно встановити закономірності і залежності зміни навантаження опорних конструкцій від режимів роботи стрічкового конвеєра, на основі отриманих закономірностей сформулювати принципи керування конвеєром, що дозволить зменшити конструктивні розміри при проектуванні та металоємність ставу, а у існуючих установок подовжити строк служби, збільшити надійність та зменшити наявність роликів, що не обертаються.

Виклад матеріалу і результати. Розглянемо рішення задачі оптимізації маси підтримуючих конструкцій з урахуванням визначальних умов появи максимальних зусиль від основних та додаткових видів навантаження.

Уявімо масу конвеєрного ставу у вигляді функціонала

$$C = \sum_{j=1}^n l_j [\sigma]^{-1} m_e,$$

де l_j - довжина j -ї ділянки конвеєрного ставу, см; $[\sigma]$ - напруга, що допускається для матеріалу прогонів і стайок, кг/см²; m_e - лінійна маса елемента, що залежить від сумарного згинального моменту

$$m_e = f(M_{i\Sigma})$$

прикладеного до несучої балки секції става.

Згідно прийнятій розрахунковій схемі навантажень, що діють на поздовжню балку секції става, очевидно, що тут діє поперечний вигин, при якому в кожному поперечному перерізі балки, крім згинального моменту, є ще й поперечна сила. У такому випадку, як відомо, треба робити перевірку міцності або підбирати розміри перерізу балки по небезпечному перерізу. Значить і сумарний момент визначається для небезпечного перерізу, як сума моментів від вертикальних M_i^B і горизонтальних M_i^F складових сил, що збурюють, тобто

$$M_{i\Sigma} = \sqrt{(M_i^B)^2 + (M_i^F)^2}$$

Крім того, його можна представити як суму моментів діючих від основних та додаткових видів навантажень без урахування защемлення балки

$$M_{i\Sigma} = M_n + M_K + M_T + M_D,$$

де M_n , M_K , M_T , M_D - відповідно згинальні моменти, викликані потоком вантажу, шматків, тяговим зусиллям та додатковим навантаженням.

Таким чином, підставляючи у функціонал металоємності величину максимально-допустимого навантаження, визначимо масу конвеєрного става, а підставляючи навантаження від потоку вантажу, від великих шматків, тягового зусилля одержимо частину маси става якби обумовлену даним фактором. Відношення частини маси става, зумовленої окремим фактором, до загальної маси конвеєрного става дає вагову значимість ($y\%$) кожного з основних видів навантажень у формуванні металоємності. Зробимо розрахунок, користуючись даними для конвеєрів виробництва ПО НКМЗ типу ЛК 5250 (15341PP).

Навантаження від потоку, як видно, залежить від гранулометричного складу, швидкості транспортування, натягу та інших факторів і складає 45-50% від загального навантаження в усталеному режимі, що за розрахунком визначає 50-58% маси става

$$C_n / C = \left[\frac{\sum_{j=1}^n l_j [\sigma]^{-1} f(M_n)}{\sum_{j=1}^n l_j [\sigma]^{-1} f(M_{i\Sigma})} \right] \cdot 100\% = 50 + 58\%$$

де C_n – частина маси конвеєрного става, обумовлена величиною навантаження на конвеєр від потоку вантажу; $f(M_{i\Sigma})$ - погонна маса елемента, що залежить від потоку матеріалу.

Навантаження від транспортування окремих великих шматків з малою кількістю підсипання або без підсипки взагалі супроводжується ударами шматків по роликоопорам і становить у відсотках від загального навантаження

$$M_K \cdot 100\% / M_{i\Sigma} = 16 \div 20\%,$$

що в загальній вазі секції става становить

$$C_K / C = \left[\frac{\sum_{j=1}^n l_j [\sigma]^{-1} f(M_K)}{\sum_{j=1}^n l_j [\sigma]^{-1} f(M_{i\Sigma})} \right] \cdot 100\% = 18 \div 22\%,$$

де C_K – частина маси конвеєрного става, обумовлена навантаженням від шматків вантажу; $f(M_K)$ – погонна маса елемента, що залежить від великих шматків вантажу.

На решту навантажувальних факторів (тягове зусилля, провисання стрічки з вантажем, коливання стрічки) припадає до 35% всього навантаження, що за розрахунком формує 24-28% металоємності става.

Під час пуску конвеєра (розглядаємо пуск завантаженого конвеєра, як більш важкий випадок) картина навантаження става дещо змінюється. У початковий момент пуску навантаження від потоку матеріалу відсутнє, так як ще немає руху (немає поняття про потік, як такий). У цей момент на конструкції става діє момент $M_{B\Sigma}$ від сумарного вертикального навантаження гірничої маси, стрічки, роликоопор

$$M_{B\Sigma} = x (q_r + q_n + q_{p.o}),$$

де x – відстань від небезпечного перерізу до опори конвеєрного става, м. Цей момент становить у загальному навантаженні при пуску

$$(M_{B\Sigma} / \sum_{i=1}^m M_{in}) \cdot 100\% = 46 \div 50\%,$$

що наступним чином відбивається на металоємності става конвеєра

$$\left[\frac{\sum_{j=1}^n l_j [\sigma]^{-1} f M_B}{\sum_{j=1}^n l_j [\sigma]^{-1} f \left(\sum_{i=1}^m M_{in} \right)} \right] \cdot 100\% = 50 \div 58\%,$$

де остання сума – сумарне навантаження на секцію ставу при пуску; m – кількість роликкоопор в секції; j – порядковий номер даної роликкоопори ставу в секції.

Навантаження від окремих великих шматків, у вигляді імпульсного удару, навпаки, збільшується, тому що змінюється швидкість зіткнення шматка з роликкоопор при пуску.

При пускових режимах підвищений вплив надає тягове зусилля, особливо за наявності роликів, що не обертаються. Навантаження від тягового зусилля, посилені впливом на роликкоопору стрічки з вантажем, провисає. Ці фактори створюють згинальний момент M_T , який у загальному навантаженні при пуску становить 10-12%, а в металоемності секції ставу 22-18%.

Коливання конвеєрного ставу, викликані самими різними причинами, мають особливе значення при призначенні металоемності конструкцій, особливо при вирішенні завдань щодо їх полегшення. У більшості своїй вони впливають на втомні накопичення деформації в елементах конструкцій.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз методів розрахунку окремих елементів опорних конструкцій показує, що є значний розкид металоемності конвеєрів одного виду і значення в залежності від методів, застосовуваних транспортними організаціями, так як, в більшості випадків для спрощення ряд навантажувальних факторів враховують коефіцієнтами запасу міцності. Такий підхід криє в собі резерв зниження металоемності. Застосування автоматизованих методів розрахунку опорних конструкцій на ЕОМ із завданням уточнених навантажень для найбільш важких режимів роботи установки, дозволяє враховувати:

динамічні процеси, що відбуваються в елементах ставу;

зміну гранулометричного складу вантажу, а саме, наявність великих шматків вантажу та інші умови експлуатації;

забезпечує уніфікований підхід до розрахунку.

Як наслідок, зниження металоемності ставу на стадії проектування на 10-14% на одному конвеєрі типу ЛК-5250. Сучасні конвеєрні лінії мають велику протяжність, тому зменшення навантаження на опорні конструкції дозволяє знизити їх металоемність на 25 – 30%. Вдосконалення експлуатації довгих конвеєрів потребує розробки систем, що оптимізують режим їх роботи за критерієм мінімуму навантаження на опорні конструкції при транспортуванні корисних копалин.

Впровадження адаптивної системи керування дозволяє підвищити ефективність роботи виробництва та зменшити металоемність. При розробці таких систем необхідно враховувати запропоновані принципи побудови автоматизованої системи конвеєра, що відрізняються тим, що враховуються як поточний, так і прогнозований стан вантажопотоку. Своєчасне виявлення зміни гранулометричного складу вантажопотоку дозволяє швидко реагувати на нову інформацію та корегувати управляючі впливи шляхом впровадження адаптивного регулятора.

Список літератури

1. **Лобов В.Й., Єфіменко Л.І., Тиханський М.П.** Автоматизовані системи керування конвеєрними установками. Монографія. Видавничий центр ДВНЗ «КНУ». Кривий Ріг. 2015. 450с.
2. **Єфіменко Л.І., Тиханський М.П.** Моделювання навантаження на опорні конструкції важких стрічкових конвеєрів. *Вісник Криворізького національного університету* : збірник наукових праць. Вип.34. Кривий Ріг, 2013. С.34-37.
3. **Бугров С.В.** Адаптивная система управления с использованием стабилизирующего эффекта девиации коэффициента регулятора / С.В. Бугров, Р.А. Лисовой, В.А. Жмудь, А.Б. Колкер // *Научный вестник НГТУ*. 2010. № 1(38). С. 157–160.
4. **Ишимцев Р.Ю.** Обоснование структуры и критериев оптимизации САУ непрерывного технологического процесса. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск, 2008. № 2(52). С. 3 – 10.
5. **Ким Д. П.** Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. Т. 2.
6. Detecting Process Variations in Low-End PID Autotuners. Alberto Leva, GianAntonio Magnani. 2002 IFAC. 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain.
7. **Александров А.Г.** Оптимальные и адаптивные системы: Электронная книга. М., 2003. 278 с
8. **Єфіменко Л.І., Тиханський М.П., Тиханська А.М.** Визначення навантаження на став автоматизованого конвеєра від швидкості транспортування. *Гірничий вісник*. 2018. № 104. С.173-178. DOI: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-173-178

9. **Лобов В.Й.** Автоматизовані системи керування конвеєрними установками: монографія / В.Й. Лобов, Л.І. Єфіменко, М.П. Тиханський, С.А. Рубан. Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2015. 450 с. ISBN 978-966-132-027-6

10. **Новиков Е.Е., Смирнов В.К.** Теория ленточных конвейеров для крупнокусковых горных пород. Киев: Наукова думка, 1998. 184 с.

11. **Монастырский В.Ф.** Экспериментальные исследования грузопотока крупнокускового груза / В.Ф. Монастырский, В.Ю. Максютенко, В.И. Плахотник, В.И. Бесчастный. Шахтный и карьерный транспорт. М.: Недра, 1999. Вып. 11. С. 7-14.

12. **Коваль А.В.** Исследование динамических нагрузок на выбор конструктивных параметров роликкоопор шахтных ленточных конвейеров: Дис. канд. техн. наук. М., 1995.

13. **Козлов Е.М.** Определение нагрузок на основные элементы тяжелых ленточных конвейеров ГОКов. Шахтный и карьерный транспорт. М.: Недра, 2000. С. 24-27.

14. **Єфіменко Л.І., Тиханський М.П.** Оценка влияния отдельных нагрузок действующих на формирование металлоемкости става ленточного конвейера. *Вісник Криворізького національного університету* : збірник наукових праць. Вип.33. Кривий Ріг, 2013. С.211-215.

15. **Абрамов, О. В., Розенбаум А. Н.** Прогнозирование состояния технических систем. М.: Наука, 1990. 126с.

15. **Тиханський М.П., Єфіменко Л.І.** Методи й системи діагностики та прогнозування технічного стану стрічкових конвеєрів. *Вісник Криворізького технічного університету* : збірник наукових праць. Вип.21. Кривий Ріг, 2008. С.163-167

16. **Єфіменко Л.І., Тиханський М.П.** Принципи побудови автоматизованої системи діагностики технічного стану конвеєра. *Вісник Криворізького технічного університету* : збірник наукових праць. Вип. 25, 2010. С. 163-167

Рукопис подано до редакції 17.11.2021

УДК 621.771

В.А. ЧУБЕНКО, Т.П. ЯРОШ, кандидати техн. наук, доценти, А.А. ХІНОЦЬКА, ст. викл.
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ В ПРОЦЕСАХ ПРОКАТУВАННЯ МЕТАЛОВИРОБІВ

Мета роботи полягає у тому, щоб дослідити структурні перетворення металів і сплавів при обробці тиском для встановлення режимів обтиснення, які дозволять підвищити якість металовиробів. При розробці нових технологічних процесів прокатування особлива увага приділяється якості отриманих металовиробів, яка цілком залежить від внутрішньої будови металів і сплавів. У зв'язку з цим вивчення впливу режимів обтиснення на структуру металу є задачею актуальною, вирішення якої забезпечить отримання високоякісної продукції.

Методи дослідження базуються на використанні фундаментальних положень матеріалознавства та теорії обробки металів тиском. Експериментальні дослідження проводились з урахуванням особливостей визначення структури металу з використанням металографічного мікроскопу.

Наукова новизна полягає у вивченні впливу режиму обробки при обтисненні на ступінь аморфності металів і металевих сплавів.

Практична значимість роботи полягає у встановленні раціональних режимів обробки, що дозволяють підвищити якість металовиробів за рахунок збільшення ступеня аморфності.

Результати. Було здійснено мікроструктурний аналіз будови металів і сплавів та досліджено металографічні знімки мікрошліфів низьковуглецевої сталі, які показали, що структура металів і металевих сплавів складається з зерен і границь між ними. Запропоновано границі зерен вважати аморфними. Визначено залежність ступеня аморфності сталі від величини зерна внутрішньої будови та досліджено вплив швидкості охолодження на відношення температури аморфізації до температури плавлення, що дозволяє керувати процесом кристалізації. Проаналізовано вплив режимів обтиснення при обробці на зміну структури металовиробів. Встановлено режими обтиснення, що забезпечують інтенсивне збільшення величини аморфізації низьковуглецевої сталі. Визначено способи збільшення ступеня аморфності у внутрішній структурі сплавів, які забезпечують підвищення якості металовиробів.

Ключові слова: внутрішня будова, структура, зерна, мікрошліф, режими обтиснення, аморфізація, ступінь деформації.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-140-144

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Майже вся металопродукція, що використовується в машинобудуванні, будівництві, транспорті, авіації, верстатобудуванні та інших галузях виготовляється за допомогою процесів прокатування. Такі металовироби повинні витримувати великі навантаження, що діють на них, повинні задовольняти високі вимоги не тільки за точністю розмірів, але й за будовою внутрішньої структури, яка впли-