

**Ю.Б. МИХАЙЛОВСЬКИЙ**, канд. техн. наук, доц.,  
Хмельницький національний університет

**В.В. ЗАЯЦЬ**, асп., Хмельницький національний університет

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У РОТОРНИХ ДИСКОВИХ ПОДРІБНЮВАЧАХ**

Розглянуто основні особливості, що найбільш впливають на процес подрібнення у роторному дисковому подрібнювачі. Проведені експериментальні дослідження основних параметрів системи, що найбільш суттєво впливають на процес подрібнення полімерних матеріалів у роторному дисковому подрібнювачі.

Ключові слова: подрібнювач, полімерні матеріали, робочий орган дисперсія.

Рассмотрены основные особенности, которые наиболее влияют на процесс измельчения в роторном дисковом измельчителе. Проведены экспериментальные исследования основных параметров системы, которые наиболее существенно влияют на процесс измельчения полимерных материалов в роторном дисковом измельчителе.

Ключевые слова: измельчитель, полимерные материалы, рабочий орган, дисперсия.

Basic features which most influence on the process of growing shallow in the rotor disk grinding down are considered. Experimental researches of basic parameters are conducted systems which most substantially influence on the process of growing of polymeric materials shallow in the rotor disk grinding down. Keywords: grinding down, polymeric materials, working organ, dispersion.

### **Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями**

Швидкий розвиток машинобудування обганяє розвиток теоретичної бази, і багато машин часто створюються без достатніх розрахунків, а іноді при їх відсутності. Так, використання гідравлічних, пневматичних, електричних пристроїв наражається на складності теоретичних розрахунків. В цих випадках приходиться на допомогу експеримент, що дозволяє одержати дані для теоретичного або практичного вирішення задачі.

Для проведення експериментів часто потрібна методика з включенням комплексу зв'язаних між собою одночасних вимірювань. Це в свою чергу пред'являє підвищені вимоги до чутливості і точності вимірних приладів. З іншого боку, розвиток спеціальних областей фізики, електротехніки і електроніки, комп'ютерної техніки і технологій відкрило можливості, яких раніше не мала вимірювальна техніка. На зміну застарілим приладам приходять більш досконалі, придатні для вирішення складних експериментальних задач.

Такими приладами в багатьох випадках є електричні датчики, що перетворюють механічні величини, що вимірюються, в електричні. Цей метод вимірювання механічних параметрів одержав в даний час широкого розвитку.

**Використання електричних методів надає електровимірювальній техніці нову якість. Датчики електричного методу вимірювання можуть бути практично безінерційними, вплив тертя практично відсутній. Задачі вимірювань над швидкоплинних процесів перестали бути важкими. Регістрація ведеться як осцилографами так і комп'ютерною технікою з наступним автоматизованим процесом обробки результатів вимірювання.**

**Одною з найбільш прогресивних областей вимірювальної техніки (технологій) є електричні вимірювання неелектричних величин. З іншого боку розвиток науки і техніки на сучасному етапі неможливий без використання електричних вимірювань неелектричних величин. Ці вимірювання потрібні при проведенні досліджень, розробці, експериментальній перевірці, контролі якості продукції і автоматизації.**

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми**

Вирішення великої кількості взаємопов'язаних аналітичних рівнянь може бути не зовсім точним або приводити до значної похибки, що обумовлена або можливостями самої чисельної методики або похибками, що накопичуються при округленні числових значень. Тому у сучасних системах МКЕ використовуються методики контролю точності отриманого рішення. Однак навіть такий підхід не дозволяє врахувати всі можливі ситуації в яких може виникати суттєва похибка вирішення. В більшості випадках похибка вирішення пов'язана з не вірною постановкою початкових, граничних умов моделі та простими похибками вводу даних параметрів моделі. Будь-яка інженерна розробка повинна задовольняти визначеним критеріям. Відповідність цим критеріям можлива тільки при комплексній оцінці впливу геометричних параметрів, властивостей використовуваних матеріалів і умов роботи виробу. Для вирішення таких задач використовуються чисельні методи, в основу яких покладена заміна розрахункової моделі з безперервним розподілом параметрів і нескінченним числом ступенів свободи дискретною моделлю, що має кінцеве число невідомих. Серед чисельних методів найбільш розповсюдженим є метод кінцевих елементів (МКЕ). Однак для перевірки отриманих математичних моделей також необхідно проводити експериментальні дослідження. Експериментальні дослідження дають можливість отримати підтвердження адекватності математичної моделі реальним процесам. В нашому випадку використовуючи метод кінцевих елементів (МКЕ) отримано дискретно аналітичну модель, що має велику кількість взаємопов'язаних рівнянь. Кількість рівнянь визначається ступенем дискретизації форми та кількістю факторів що враховуються у моделі. При збільшенні складності моделі кількість взаємопов'язаних аналітичних рівнянь значно зростає [1].

Вирішення великої кількості взаємопов'язаних аналітичних рівнянь пов'язано з необхідністю проводити великої кількості обчислень а також за рахунок використання різноманітних математичних рівнянь, неможливо вирішити аналітично. Для великої кількості взаємопов'язаних аналітичних рівнянь використовують чисельні методики явного та неявного способу вирішення.

## Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Дискретна аналітична модель процесу подрібнення дисковим подрібнювачем полімерних відходів у роторному дисковому подрібнювачі потребує перевірки на адекватність математичних моделей реальним процесам, що відбуваються в зоні подрібнення, необхідна експериментальна перевірка, яка дозволить також визначити ступінь впливу на процеси факторів, що не враховувались в аналітичних моделях.

## Виклад основного матеріалу досліджень

Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено експериментальне устаткування яке дозволяє реалізувати процес подрібнення з можливістю зміни факторів, що вивчаються, та реєструвати параметри, що досліджуються. При дослідженні процесу подрібнення використовувались полімерні матеріали, які застосовуються для виготовлення взуття шляхом розкрою листових заготовок та відходи після відливу. Для одержання функціональних та статистичних зв'язків між факторами, які впливають на процес подрібнення та вихідними параметрами, були проведені експериментальні дослідження. Дослідження процесу подрібнення полімерних відходів велося на експериментальній установці (рис.1), яка дозволяє моделювати процеси, що відбувається при подрібненні.

Пристрій для подрібнення полімерних матеріалів містить завантажувальний отвір 3, корпус 1, на якому закріплені контрножі 2 та втулки 7, решітку 6, яка розміщена внизу робочої камери, вал 5, на якому розміщені ножі 4 та втулки 8. Ножі 4 та контрножі 2 розміщені в шахматному порядку, за рахунок втулок 7 та 8 (на рис. не показано). Подрібнюючий пристрій приводиться в дію за допомогою приводу (на рис. не показано).

Конструкція механізму вибрана таким чином, щоб забезпечити дослідження основних параметрів процесу подрібнення.

Конструкція експериментальної установки дозволяє змінювати швидкість обертання валу ротора з дисками в межах від 1580 до 3200 об/хв, використовуючи різноманітні передаточні співвідношення шківів, що встановлюються на валу електродвигуна та валу дискового подрібнювача.

Експериментальна установка обладнана системою контролю і реєстрації параметрів процесу подрібнення (рис. 2), що приєднується до приводу і дозволяє контролювати та реєструвати його потужність під час роботи.

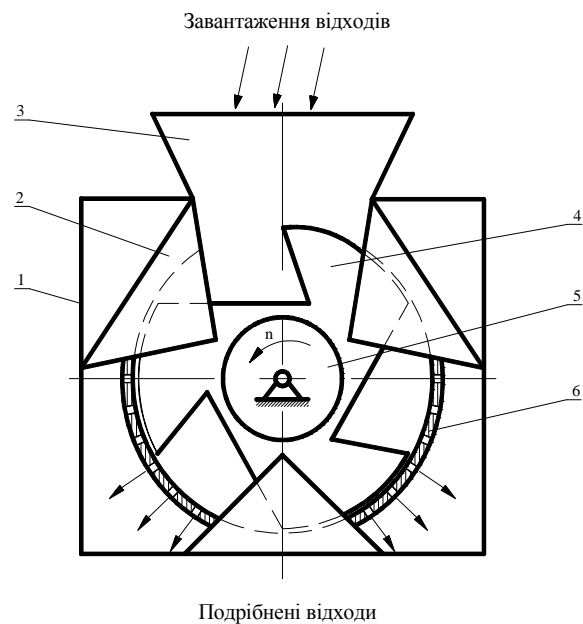


Рис. 1- Схема експериментальної установки.

1-корпус; 2-конт-ножі; 3- завантажувальний отвір; 4-ножі; 5-вал; 6-решітка; 7-втулки

Ця конструкція була розроблена на основі аналізу аналітичних залежностей. Технічна характеристика експериментальної установки наведена в таблиці 1. Конструкція установки дозволяє змінювати в доволі широких межах конструктивні і технологічні параметри і таким чином дозволяє досліджувати вплив цих параметрів на процес подрібнення, а також здійснювати необхідні вимірювання і записувати їх.

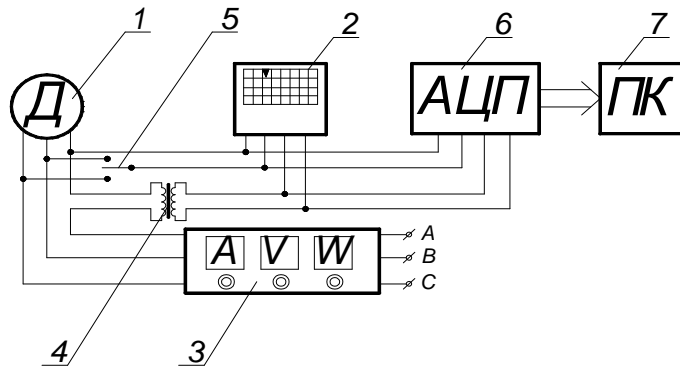


Рис. 2- Схема системи контролю і реєстрації параметрів процесу подрібнення: 1-двигун; 2-прилад самопишучий Н350; 3-прилад вимірювальний К50; 4-трансформатор току; 5-перемикач обмоток напруги; 6- аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 7- персональний комп'ютер

Таблиця 1 - Технічна характеристика експериментальної установки

Частота обертання ротора дискового подрібнювача, с <sup>-1</sup>	2...10
Співвідношення довжини ріжучої кромки диска до довжини ротору	3,2...9,6
Кут заточування ріжучої кромки диска	30°...90°
Частота обертання електродвигуна, об/хв	2990
Габаритні розміри, мм	
довжина	1250
ширина	800
висота	550

При проведенні експериментальних досліджень ефективність процесу подрібнення визначалась наступними показниками:

- вагова продуктивність експериментальної установки;
- енергетичні витрати на подрібнення;
- дисперсія, яке отримане після переробки;
- коефіцієнт співвідношення довжини ріжучої кромки диска до довжини ротору.

Вагова продуктивність  $Q$  визначалась шляхом зважування подрібненого полімеру, що отримано за деякий проміжок часу при сталому процесі подрібнення, і для отримання більш точних даних для кожного режиму визначалось середнє значення вагової продуктивності за формулою:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{m_i}{t_i}}{k}, \quad (1)$$

де  $k$  - кількість зважувань;

$m_i$  - вагова  $i$ -ї порції матеріалу;

$t_i$  - проміжок часу в який отримана вага  $m_i$ .

Енергія, що витрачається на подрібнення полімерних матеріалів в експериментальній установці визначалась за допомогою системи вимірювань і запису.

Використовуючи дані експериментальних досліджень, енергію, що витрачається на подрібнення, можливо визначити з потужності, і розраховується вона як різниця загальної потужності та потужності холостого ходу. Для отримання більш точних даних для кожного режиму визначалось середнє значення енергії, яка витрачається на подрібнення матеріалу за формулою:

$$A = t \frac{\sum_{i=1}^k (W_i - W_{xx})}{k}, \quad (2)$$

де  $W_i$  - потужність загальна, яка відповідає  $i$ -му виміру;

$W_{xx}$  - потужність, що витрачається на холостому ходу.

При проведення експериментальних досліджень були використані полімерні відходи матеріалів, що використовуються у легкій промисловості. Дисперсію після подрібнення цих полімерних відходів після переробки для кожної групи може бути різна, і її необхідно визначати окремо для кожної групи, як середню згідно з формулою

$$L_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^k L_i}{k}, \quad (3)$$

де  $L_i$  - розмір  $i$ -го куска.

Коефіцієнт співвідношення довжини ріжучої кромки диска до довжини ротору:

$$K_p = \frac{L_p}{L_{рот}} = \frac{n_o L_{p.д.}}{L_{рот}} \quad (4)$$

де  $L_p = n_o L_{p.д.}$  - сумарна довжина ріжучих кромок дисків;

$L_{рот}$  - довжина ротора;

$n_o$  - кількість дисків на роторі;

$L_{p.д.}$  - довжина ріжучих кромок на диску.

З метою визначення параметра оптимізації та вибору схеми планування експерименту був проведений аналіз апріорної інформації [2,7,8,9]. Такий аналіз дозволив встановити фактори, від яких залежить кількісні та якісні показники процесу подрібнення. На основі цього аналізу зроблені висновки, що при руйнуванні полімерних матеріалів в дискових подрібнювачах дисперсія після подрібнення та енерговитрати залежать від наступних факторів:

- швидкості деформування;
- температури;
- фізичних властивостей матеріалу;
- геометричних параметрів робочого ограну;
- швидкості подачі матеріалу.

В свою чергу деякі з цих факторів є похідними геометричних та технологічних параметрів пристрою для подрібнення, що дозволить проводити

дослідження, оперуючи останніми. Виходячи з цього, розділимо змінні параметри експериментальної установки на групи, згідно з їх зв'язками з факторами.

Величина швидкості деформування залежить від окружної швидкості робочого органу подрібнювача. Швидкість подачі матеріалу залежить від вагової продуктивності. Температуру можна рахувати незалежним фактором, так як вона практично не змінюється під час подрібнення і є сталою величиною і її можливо враховувати у властивостях матеріалу.

Ефективність процесу подрібнення відходів полімерних матеріалів оцінюється двома критеріями:

- витратами енергії на подрібнення деякої ваги матеріалу;
- дисперсія після подрібнення.

Проводячи експериментальні дослідження процесу подрібнення, були використані наступні фактори: окружна швидкість дискового ротора; співвідношення довжини ріжучої кромки диска до довжини ротору, кут заточування ріжучої кромки диска.

Параметрами оптимізації були прийняті енерговитрати на подрібнення віднесені до ваги та дисперсії після подрібнення. Ці параметри оптимізації повністю відповідають вимогам, що висуваються до параметрів оптимізації при плануванні експерименту [2,7,8,9].

Аналітичні дослідження процесу руйнування показали, що для отримання точної моделі (параметра оптимізації) необхідно використовувати алгебраїчний поліном другого порядку

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < l \leq k} b_{il} x_i x_l + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2, \quad (5)$$

де  $b_i, b_{il}, b_{ii}$  - коефіцієнт регресії;

$x_i, x_l$  - змінні фактори.

В зв'язку з цим було прийняте рішення проводити експеримент, використовуючи некомпозиційне рототабельне планування другого порядку [2]. При дослідженні процесу з трьома факторами раціональним є не композиційний рото табельний план планування другого порядку.

Проводячи регресійний аналіз і перевіряючи адекватність моделі по критерію Фішера [9], було отримане рівняння регресії, що описує функцію залежності енерговитрат на подрібнення віднесену до ваги та дисперсії після подрібнення від: окружної швидкості ротора; співвідношення довжини ріжучої кромки диска до довжини ротору; кута заточування ріжучої кромки диска.

Отримано рівняння регресії:

$$\begin{aligned} y = & 0.4333 + 1.5 \times 10^{-4} \frac{X_1 - 2}{8} - 7.5 \times 10^{-5} \frac{X_2 - 3.2}{6.4} + 0.05247 \frac{X_3 - 30}{60} - \\ & - 4.2499 \times 10^{-4} \left( \frac{X_1 - 2}{8} \times \frac{X_2 - 3.2}{6.4} \right) - 1.2499 \times 10^{-4} \left( \frac{X_1 - 2}{8} \times \frac{X_3 - 30}{60} \right) - \\ & - 5.7499 \times 10^{-4} \left( \frac{X_2 - 3.2}{6.4} \times \frac{X_3 - 30}{60} \right) - 9.6249 \times 10^{-4} \left( \frac{X_1 - 2}{8} \right)^2 - \\ & - 0.0012 \left( \frac{X_2 - 3.2}{6.4} \right)^2 + 0.0095 \left( \frac{X_3 - 30}{60} \right)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Проводячи порівняльний аналіз (рис. 3) було встановлено, що дискретно аналітична модель та регресійна залежність (6) задовільно узгоджується

(відносне відхилення експериментальних значень від теоретичних не перевищує 15%), що підтверджує правомірність допущень, які були прийняті при обґрунтуванні аналітичної моделі процесу подрібнення.

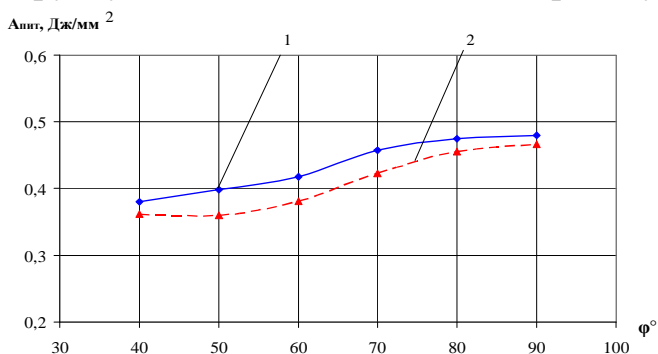


Рис. 3 Визначення питомої роботи руйнування в залежності від кута загострення. 1- теоретичний; 2- експериментальний

Провівши експериментальні дослідження було встановлено об'ємну продуктивність подрібнювального обладнання від наступних факторів: а) коефіцієнт співвідношення довжини ріжучої кромки (рис.4); б) від швидкості обертання дисків. Аналізуючи вплив швидкості (рис. 5) подрібнення було встановлено, що вона є лінійною і впливає пропорційно на об'ємну продуктивність і залежить лише від

швидкості обертання робочого органу.

Аналізуючи графічні залежності об'ємної продуктивності від коефіцієнта довжини ріжучих кромки було встановлено, що збільшення величини даного коефіцієнта веде до зростання об'ємної продуктивності і ця залежність має не лінійний характер. Не лінійний характер даних залежностей обумовлений тим, що в процесі подрібнення при збільшенні дисперсності відбувається зменшення об'ємної продуктивності, внаслідок збільшення додаткових витрат на процес перемішування матеріалу в робочій камері, що підтверджується регресійною залежністю (б).

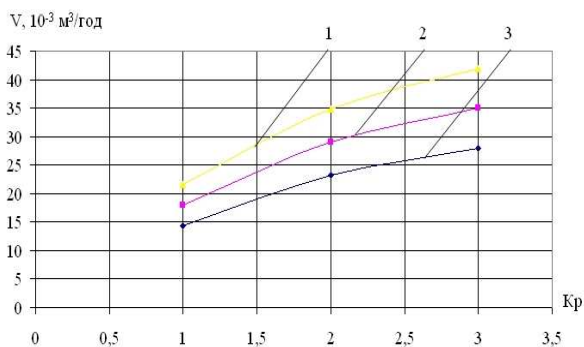


Рис. 4—Залежність об'ємної продуктивності подрібнення від довжини ріжучих кромки дисків на одиницю довжини при швидкості обертання: 1- 90 об/хв.; 2-60 об/хв.; 3-30 об/хв...

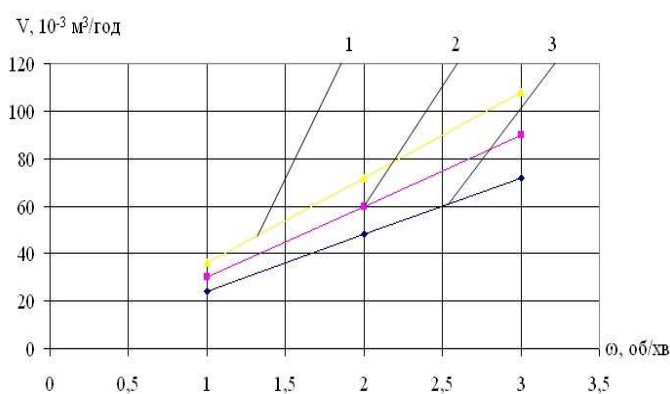


Рис.5—Залежність об'ємної продуктивності подрібнення від швидкості обертання дисків при коефіцієнту довжини ріжучих кромки: 1- 1,6; 2-0,8; 3-0,53.

Розбіжності математичної моделі і результатів дослідів обумовлені неминучою помилкою експерименту і неточністю рівнянь регресії, а також деякою невідповідністю математичної моделі, в наслідок прийнятих при аналітичному дослідженні положень для спрощення.

## **Висновки і перспективи подальшого розвитку даного напрямку**

Отримана регресійна залежність підтверджують правомірність і відповідність дискретно аналітичної моделі реальним процесам, що відбуваються у роторному дисковому подрібнювачі відходів полімерних матеріалів. Відносне відхилення не перевищує аналітичних значень від експериментальних значень знаходиться у межах 15%. Розроблена аналітична модель та методика моделювання є адекватна реальним процесам та дозволяє визначити питому роботу подрібнення в залежності від конструктивних та технологічних параметрів. При цьому враховуються матеріал диска та його параметри, а також враховуються властивості матеріалу, що переробляється та ступінь його дисперсності. При проектуванні, за допомогою аналітичної моделі, можна буде визначити всі існуючі параметри і фактори взаємодії інструменту з матеріалом. В подальшому, представлена модель, може бути використана для загального проектування дискових роторних подрібнювачів .

**Список літератури:** 1. Скиба М.Є. Моделювання процесу подрібнення композиційних матеріалів з використанням методу скінчених елементів [Текст] /М.Є. Скиба, ., Ю.Б.Михайловський , Г.С.Головко // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2003. -№ 6. –С. 7-10. 2. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов [Текст]: Учеб./А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев. – Свердловск: изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1975. – 140 с. 3. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента [Текст] /Ю.П. Адлер. - М.: Металургия, 1969. -157 с. 4. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий[Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова , Ю.В. Грановский. - М.: Наука, 1971. - 282 с. 5. Бондарь Л.Г. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии [Текст] /Л.Г. Бондарь ,Г.Л. Статюха , И.Л. Потяженко . - К.: Вища школа, 1980. - 264 с. 6. Налимов В.В. Новые идеи в планировании эксперимента[Текст]/ В.В. Налимов. — М.:Наука, 1971, - 334 с. 7. Налимов В.В. Статистические методы планирования экспериментальных экспериментов [Текст]/ В.В. Налимов, Н.А. Чернова ; - М.: Наука, 1965.- 252 с. 8. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст]/ А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981 -184 с. ил. 9. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента [Текст]/ А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев ; - Свердловск, изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1975. -152 с.

*Поступила в редколлегию 21.02.2011*

**УДК 629.4.08**

**Д.Ю. ЗУБЕНКО** , канд. техн. наук, доц., ХНАМГ, м. Харків

## **ОЦЕНКА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ГОРОДСКОМ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТЕ**

Рассмотрены состояние и перспективы развития современных методов оценки физико-механических характеристик металлов применяемых на городском электротранспорте. Предложен новый подход для построения систем оценки технического состояния материалов и изделий.

Ключевые слова: подвижной состав, трамвай, метрополитен, техническое состояние.

Розглянуто стан та перспективи розвитку сучасних методів оцінки фізико-механічних характеристик металів що застосовуються на міському електротранспорті. Запропоновано новий підхід для побудови систем оцінки технічного стану матеріалів і виробів.