

О. А. КУЗИН (Національний університет «Львівська політехніка»), Т. М. МЕЩЕРЯКОВА (Львівська філія ДПТУ), М. О. КУЗИН (Львівська залізниця)

РОЛЬ СТРУКТУРИ В ПРОЦЕСАХ ЗНОШУВАННЯ ФЕРИТО-ПЕРЛИТНИХ СТАЛЕЙ

Представлено результати досліджень впливу структури на механічні властивості й поведінку ферито-перлітних сталей при дії контактних навантажень. Показано, що формування відманштеттової структури має негативний вплив на працездатність сталей при статичних навантаженнях, але позитивно впливає на їх зносостійкість.

Ключові слова: сталь, структура, механічні властивості, перліт, зносостійкість, навантаження

Представлены результаты исследования влияния структуры на механические свойства и поведение ферито-перлитных сталей при действии контактных нагрузок. Показано, что формирование видманштеттовой структуры имеет негативное влияние на работоспособность сталей при действии статических нагрузок, но положительно влияет на их износостойкость.

Ключевые слова: сталь, структура, механические свойства, перлит, износостойкость, нагрузка

The results of study of influence of structure on mechanical properties and behavior of ferrite-perlite steels under the action of contact loads are presented. It is shown that the formation of the widmanstatten pattern has a negative impact on the performance of steels under static loads but a positive effect on their durability.

Keywords: steel, structure, mechanical properties, perlite, durability, load

Вступ

Нагальні потреби розвитку залізничного транспорту вимагають використання деталей і виробів з чітко означеними функціональними властивостями поверхневих шарів, активізації досліджень пов'язаних із визначенням багатомасштабності явищ у твердих тілах при їх пластичній деформації і руйнуванні [1]. Найбільш ефективними методами керування потоками поверхневих дефектів, які виникають при зовнішніх навантаженнях твердих тіл і суттєво впливають на характеристики матеріалів, є створення у виробках функціонально-градієнтних структур. Вони формуються в поверхневих шарах деталей під час їх виготовлення, відновлення або експлуатації. При цьому підвищення довговічності деталей досягається шляхом зміни напружено-деформованого стану в зоні контактної взаємодії, що дозволяє ефективно керувати потоками поверхневих дефектів, розвитком знеміцнення і деструктивних процесів поверхневих шарів, але вимагає детального аналізу ролі структурних параметрів в процесах руйнування.

Постановка задачі

Багаточисельні дослідження, присвячені вивченню впливу технологічних обробок на процеси зношування, пов'язують підвищення зносостійкості зі зміною параметрів механічних

властивостей матеріалів в зоні контактної взаємодії.

При терті контакт тіл відбувається в окремих локальних мікрооб'ємах – плямах контакту, в області яких проходять процеси деформації і руйнування матеріалу. Зносостійкість виробів визначається можливістю мікроструктури стримувати утворення і розвиток потоків поверхневих дефектів в умовах дії контактних навантажень.

Згідно сучасних уявлень деформівне тверде тіло розглядається як багаторівнева система, в якій пластична течія відбувається в результаті втрати зсувної стійкості матеріалу в полях градієнтів напружень на різних структурних рівнях. В дефектній структурі, що виникає при деформації, виділяють наступні ієрархічні рівні [2]:

1. Механічний рівень, який відповідає пружній поведінці матеріалу, оскільки в системі відсутні структурні зміни.

2. Рівень дефектів структури трансляційного типу, при якому стан системи поряд з механічним визначається також і структурними параметрами, що залежать від густини і потоків дислокацій.

3. Рівень утворення дефектів ротаційного типу, при якому суцільність матеріалу не порушується.

4. Рівень появи локальної пошкоджуваності (мікропор, мікротріщин).

5. Рівень глобального порушення суцільності, за якого в системі формуються магістральні тріщини, а в зразках або виробках втрачають фізичний зміст механічні параметри (σ , ϵ).

Для крихких матеріалів реалізуються 1-й, 4-й та 5-й ієрархічні рівні, а для пластичних – під час деформації і руйнування відбувається реалізація всіх ієрархічних рівнів структурних змін.

Структура ферито-перлітних сталей суттєво впливає на їх поведінку в умовах дії зовнішніх навантажень. Тому актуальними залишаються дослідження особливостей будови конструкційних матеріалів, які визначають кінетику їх деградації і контактну довговічність виробів. В зв'язку із цим питання підвищення зносостійкості ферито-перлітних сталей шляхом оптимізації мікроструктури є актуальними, але вимагають розробки науково обґрунтованих рекомендацій з пошуку ознак формування мікроструктури для отримання оптимального структурного стану поверхні тертя.

У зв'язку з цим, в роботі досліджуються особливості структури ферито-перлітних сталей на різних масштабних рівнях та їх зв'язок із структурно-залежними характеристиками зношування конструкційної сталі.

Матеріал і методика досліджень

Конструкційні низьковуглецеві сталі з вмістом вуглецю до 0.25 % широко використовують для виготовлення деталей рухомого складу залізниць, які працюють в умовах контактної взаємодії і зношування. Це, зокрема, візки вагонів, деталей буксових вузлів і фрикційних гасників коливачів. Під час експлуатації відбувається зношування контактних поверхонь. При відхиленні геометричних параметрів поверхонь за граничні значення проводять їх відновлення наплавленням. Під час наплавлення можливе утворення структур перегріву і, зокрема, відманштеттової.

Така структура відрізняється від інших структур ферито-перлітних сталей геометрично впорядкованим розташуванням елементів структури у вигляді пластин або голок усередині складових сплаву кристалічних зерен. Її утворення пов'язане із виділенням надлишкового фериту вздовж октаедричних пластин кристалів аустеніту при прискореному охолодженні сталі.

Ферито-перлітні сталі складаються із твердої (перліт) і м'якої (ферит) структурних складових. Особливістю роботи таких матеріалів у вузлах тертя є те, що плями контакту спираються на тверді складові, а м'яка складова слу-

гує для формування оптимальної з точки зору зношування структури поверхневого шару. Слід відмітити, що розмір плям контакту в парах тертя «сталь–сталь» в більшості випадків є співрозмірним із розмірами фаз і структурних складових. В той же час, вплив морфології структурних складових на процеси зношування є до кінця не вивченим.

В роботі досліджували доєвтектоїдні вуглецеві сталі, хімічний склад яких визначений аналітичним методом (ГОСТ 22536-87), що наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей

| № зразка | Вміст елементів, % | | | | | Нормалізація від температури |
|----------|--------------------|------|------|-------|------|------------------------------|
| | C | Si | Mn | S | P | |
| 1 | 0,25 | 0,05 | 0,41 | 0,045 | 0,04 | 900 °C |
| 2 | 0,22 | 0,06 | 0,40 | 0,045 | 0,04 | 1000 °C |
| 3 | 0,25 | 0,16 | 0,55 | 0,046 | 0,04 | 1200 °C |

Заготовки після гарячого об'ємного штампування проходили нормалізацію від температур 900...1000 °C (зразки № 1, № 2). Для отримання відманштеттової структури частину заготовок перегрівали до температури 1200 °C і проводили прискорене охолодження (зразок № 3).

Проводили вимірювання твердості за методом Бринеля на приладі ТШ-2М, мікротвердості приладом ПМТ-3, а також випробування на розтяг на розривній машині УМ-5, структуру шліфів досліджували за допомогою мікроскопа ММР-2Р, інтенсивність зношування оцінювали за методом диск-колодка на машині 2070 СМТ-1.

Результати досліджень та їх обговорення

Мікроструктура шліфів після травлення представлена на рис. 1. В зразках після нормалізації від температури 900 °C виявляється ферито-перлітна структура, причому ділянки фериту утворюють суцільні смужки по границях перлітних колоній (рис. 1, а). Розмір ділянок перліту, навколо яких знаходяться феритні смужки складають 70...80 мкм. Аналіз мікроструктур сталі методом січних [3] показав, що співвідношення між кількістю фериту і перліту залежить від режимів термічної обробки (табл. 2).

При нормалізації підвищення температури нагріву приводить до збільшення кількості перліту. В сталі, що нагрівалась до температури 1200 °C, виявляється відманштеттова структура (рис. 1, в). Розмір бувших аустенітних зерен складає 120... 150 мкм.

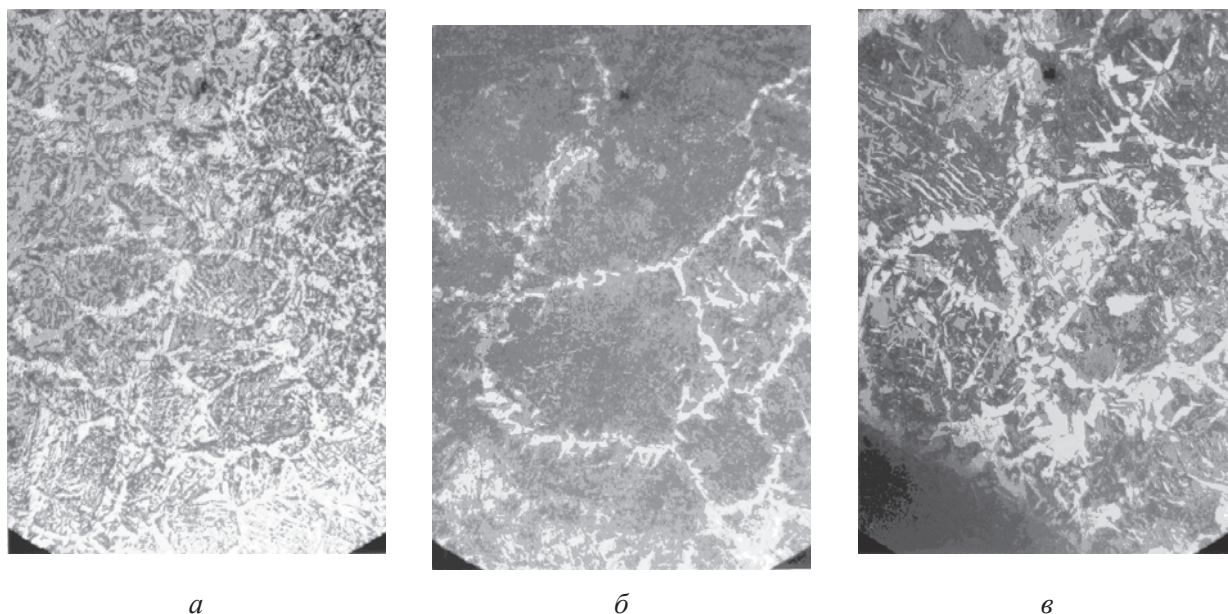


Рис. 1. Мікроструктура досліджених зразків:
а – 1, б – 2, в – 3 ($\times 124$)

Таблиця 2
Кількість фериту і перліту
в структурі досліджуваних сталей

| № зразка | Ферит, % | Перліт, % |
|----------|----------|-----------|
| 1 | 63 | 37 |
| 2 | 60 | 40 |
| 3 | 46 | 54 |

Аналіз механічних властивостей показав, що при зменшенні кількості перліту зменшуються міцність і твердість сталі (табл. 3). У разі збільшення кількості перліту міцність зростає при збереженні достатньої пластичності. При наявності відманштеттової структури (рис. 2, в) зростає міцність, але пластичність є низькою і не відповідає вимогам стандартів на механічні властивості дослідженої сталі (ГОСТ 380-84).

Таблиця 3

Механічні властивості дослідженої сталі

| № зразка | σ_B , Н/мм ² | δ , % | Ψ , % | НВ |
|----------|--------------------------------|--------------|------------|-----|
| 1 | 490 | 27 | 62 | 142 |
| 2 | 400 | 28 | 66 | 126 |
| 3 | 600 | 14 | 51 | 150 |

При вимірюваннях мікротвердості для визначення оптимального навантаження оцінювали залежність мікротвердості від величини дії навантаження P . За цими даними підібрали робоче навантаження, коли криві $H_V(P)$ виходять на горизонта-

льну ділянку, тобто мікротвердість майже не залежить від навантаження.

Відомо, що в багатьох матеріалах можливий ефект повзучості під індентором, тобто закономірне збільшення глибини і, відповідно, діагоналей відбитка зі збільшенням часу статичної дії. Тому при вимірюваннях час статичної дії вибирали таким, щоб розмір відбитка не змінювався.

Таблиця 4

Мікротвердість досліджених зразків

| № зразка | Мікротвердість складових НВ, ГПа | | $\frac{НВ_{пер}}{НВ_{фер}}$ |
|----------|-------------------------------------|---------|-----------------------------|
| | фериту | перліту | |
| 1 | 2,02 | 3,14 | 1,55 |
| 2 | 1,19 | 1,29 | 1,08 |
| 3 | 2,02 | 2,83 | 1,40 |

Результати вимірювання мікротвердості структурних складових при навантаженні 1,0 Н та витримці 30 с надані в табл. 4.

Як видно, співвідношення між мікротвердістю фериту і перліту залежить від умов термічної обробки. При підвищенні температури нагріву під час нормалізації воно зменшується, а при утворенні відманштеттової структури – зростає.

Результати випробувань на зношування при навантаженні 3,41 Н/мм² представлені на рис. 3.

Дослідження показали, що найбільша інтенсивність зношування є характерною для зразків, що нагрівались при нормалізації до 1000 °С, які мають низьку твердість і високу пластичність. Така зміна інтенсивності зношування пов'язана із впливом структури.

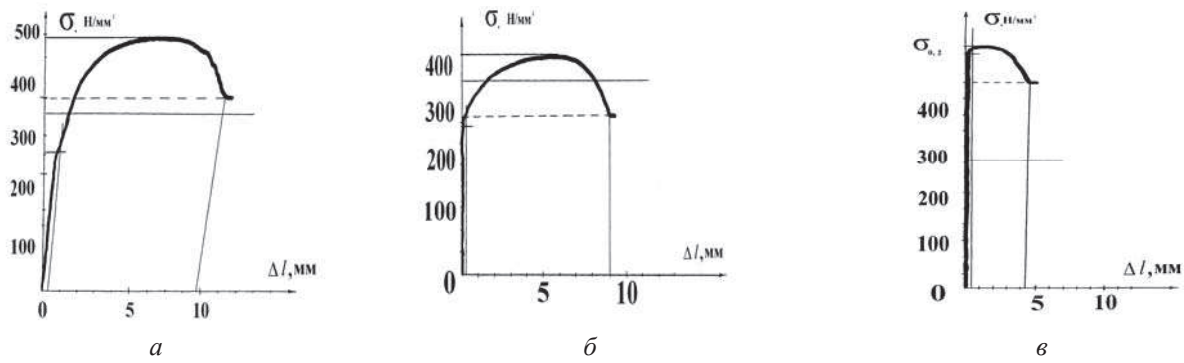


Рис. 2. Криві розтягу зразків (1, 2, 3 табл. 3):
a – зразок № 1, *б* – зразок № 2, *в* – зразок № 3

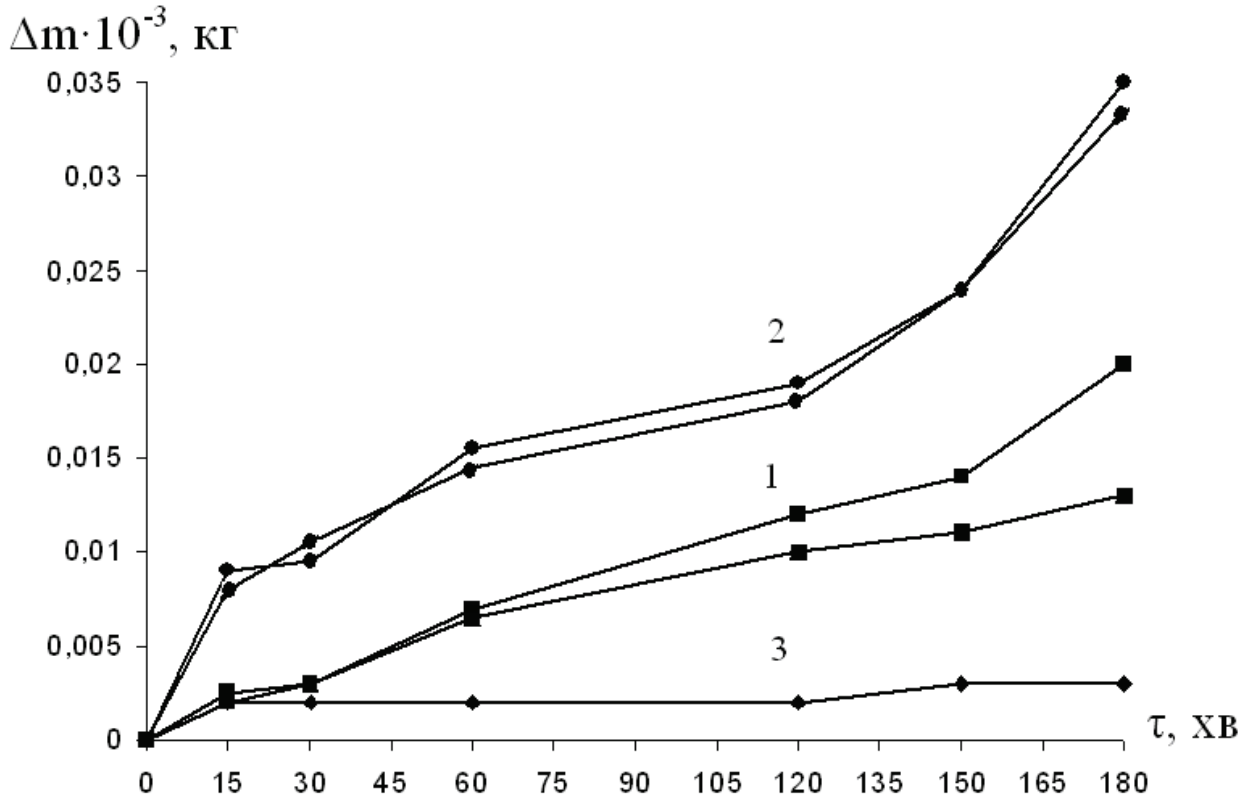


Рис. 3. Результати випробовування на зношування досліджених зразків: (1, 2, 3 табл. 3).

Аналіз результатів механічних випробовувань на розтяг та їх порівняння зі зносостійкістю показали, що при зменшенні пластичності сталі зносостійкість зростає (табл. 3, рис. 3). Слід відмітити, що отримані закономірності підтверджують результати інших авторів [4].

Значну роль у процесах руйнування при зношуванні відіграють параметри мікроструктури сталі. Зокрема, вища зносостійкість характерна для зразків, в яких кількість перліту зростає до 54 %, а менша зносостійкість для зразків, в яких кількість перліту 37 % (табл. 2). За однакової кількості перліту вирішальне значення має співвідношення мікротвердості між феритом і перлітом. В зразках, що мають таке співвідношення вище, інтенсивність зношування є меншою.

Оскільки твердість перліту є вищою за твердість фериту, то структуру двохфазних доєвтектонічних сталей слід розглядати як м'яку матрицю фериту, в якій розміщені тверді часточки перліту. Розмір плям контакту в парі тертя «сталь–сталь» знаходиться в межах від 6 до 30 мкм, а віддаль між ними – 80...120 мкм [5 – 7]. Тобто розмір плям контакту є менший за розмір ділянок перліту дослідженої сталі.

По закінченні процесу припрацювання в поверхневому шарі товщиною до 10 мкм формується орієнтована фрагментована структура. Процес нормального тертя і зношування без пошкоджень (задирів, схоплювання) визначається збереженням або утворенням стабільної структури в межах плям контакту, яка здатна

квазіпружно сприймати навантаження. Стабільність структури в межах плям контакту, обумовлена її міцністю, а також рівновагою підведення і відведення дефектів в границі фрагментів, розмір яких складає для сталі 0.9...1.2 мкм. Процеси зношування в даних умовах випробовувань пов'язані із здатністю перлітних ділянок, розмір яких перевищує розмір плям контакту чинити опір пружним, пластичним деформаціям та руйнуванню. Це підтверджують і результати дослідження мікроструктури після вимірювання твердості сталей.

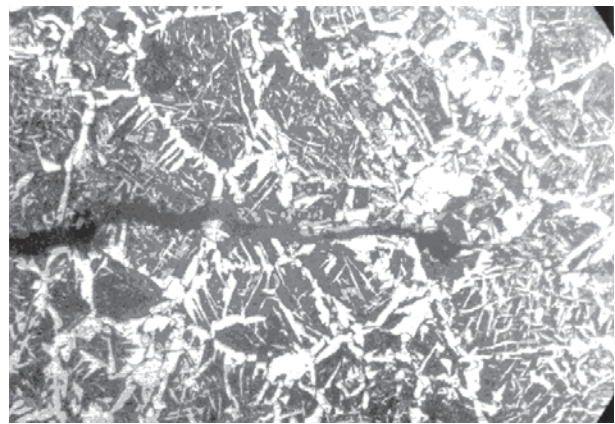
При натисненні на поверхню зразків кулькою діаметром 5 мм із зусиллям 750 кгс, біля границі відбитку формується зона пластичної деформації, в якій ділянки фериту розміщуються паралельно границі відбитку. Слід відмітити, що на поверхні зразків, які пройшли нормаліза-



а

цію при 900 та 1000 °С, утворення тріщин в зоні пластичної деформації навколо відбитку кульки не виявлено.

В сталі із відманштеттовою структурою в зоні пластичної деформації утворюються мікротріщини, які розміщуються як паралельно до границі відбитка, так і під кутом до неї (рис. 4). Причому тріщини в зразках утворюються на феритних стиках зерен, а їх поширення відбувається на границях розділу ферит-перлітних ділянок. Вплив структури на поведінку ферито-перлітної сталі в умовах контактного навантаження залежить від співвідношення розмірів області контакту та структурних складових. Структурними одиницями, які відповідають за руйнування, в умовах, коли область контакту є суттєво більшою за величину ділянок фериту і перліту, є їх границі розділу.



б

Рис. 4. Утворення (а) та поширення (б) тріщин у зоні пластичної деформації біля відбитку кульки у сталі з відманштеттовою структурою ($\times 124$)

При терті, коли розмір плям контакту менший від розміру ділянок перліту, інтенсивність зношування визначається опором деформації і руйнуванню саме цих ділянок [8, 9].

Сталь з відманштеттовою структурою має більш низьку пластичність, але вищу зносостійкість, ніж сталь з неорієнтованим розміщенням фериту, що вказує на суттєву різницю у кінетиці деградації матеріалів, яка відбувається на різних структурних рівнях в умовах розтягу, контактної стики і тертя.

Висновки

Поведінка сталі з ферито-перлітною структурою при дії контактних навантажень визначається процесами деформації та деградації, які відбуваються на різних масштабних рівнях.

В умовах сухого тертя ковзання ферито-перлітна сталь із найбільшою пластичністю характеризуєть-

ся високою інтенсивністю зношування. В сталі з відманштеттовою структурою, яка має низьку пластичність, зносостійкість є вищою. Формування відманштеттової структури в умовах технологічних обробок при відновлювальних ремонтах деталей має негативний вплив на працездатність за значних статичних або динамічних навантажень, але позитивно впливає на їх зносостійкість.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Дефекти залізничних коліс [Текст] : монографія / І. О. Вакуленко [та ін.]. – Д.: Вид-во Маковецький, 2009. – 112 с.
2. Панин, В. Е. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развитие, проблемы и перспективы [Текст] / В. Е. Панин, Ю. В. Гриняев, С. Г. Псахье // Физическая мезомеханика. – 7. Спец. выпуск. – Ч. 1. – 2004. – С. 1-25 – 1-40.
3. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография [Текст] / С. А. Салтыков. – М.: Металлургия, 1976. – 273 с.

4. Яблокова, Н. В. Разработка метода оценки износоустойчивости сталей по механическим свойствам применительно к абразивному изнашиванию [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. В. Яблокова. – М., 1984. – 21 с.
5. Рапопорт, Л. С. Влияние структурного состояния поверхностных слоев на процессы трения и изнашивания [Текст] / Л. С. Рапопорт, Л. М. Рыбакова // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, № 6. – С. 1038-1043.
6. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
7. Кузін, М. О. Вплив мікроструктури на стійкість проти спрацювання нероз'ємних з'єднань рейок після термітного зварювання [Текст] / М. О. Кузін, О. А. Кузін, Т. М. Мещерякова // Укр. акад. друкарства. Наукові записки. Наук.-техн. зб. – 2006. – № 2 (10). – С. 85-97.
8. Кузін, М. Імітаційні моделі структури для розрахунку параметрів ферито-перлітних сталей з підвищеною зносостійкістю [Текст] / М. Кузін // Укр. академія друкарства. Наукові записки. Наук.-техн. зб. – 2007. – № 1 (11). – С. 15-22.

Надійшла до редакції: 21.09.2010.

Прийнята до друку 30.09.2010.