

УДК 621.771.23-413.004.12

Г.Г. ГРАБОВСЬКИЙ*, М.Г. ІЄВЛЄВ**

УПРАВЛІННЯ МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ

*ДНВК «Київський інститут автоматики», м. Київ, Україна

**Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Конкурентоздатність українського металу на світовому ринку обумовлена високими технічними вимогами до якості в цілому, в тому числі до його механічних властивостей. Впровадження у прокатному виробництві ефективних систем автоматизованого управління механічними властивостями товстолистого прокату дозволить істотно поліпшити якість прокату. У статті описані постановка задачі управління механічними властивостями товстолистого прокату, математичні моделі прогнозу механічних властивостей прокату, основні технічні рішення, реалізовані в системі автоматизованого управління механічними властивостями прокату. Розроблена система автоматизованого управління механічними властивостями прокату включена в АСУ ТП прокатки на ТЛС, і програмно-технічне забезпечення для цієї комплексної системи частково є загальним для обох компонент. АСУ ТП прокатки функціонально суміщена з системою управління механічними властивостями прокату. Для управління механічними властивостями прокату передбачено п'ять програмованих контролерів, побудованих на базі ПЕОМ, а також на кожному посту встановлено монітори, відповідну клавіатуру і принтери. Організація функціонування автоматизованої системи контролю і управління механічними властивостями в основному використовує існуючу організаційно-технічну структуру «ручного» контролю і управління механічними властивостями. Для перевірки розробленої системи і її алгоритмів функціонування була створена лабораторна установка, що дозволила на базі ПЕОМ виконати імітаційне моделювання системи автоматизованого управління механічними властивостями прокату. При моделюванні використані експериментальні дані з реального технологічного об'єкта, підтверджена роботоздатність одержаних науково-технічних рішень. Викладені вище рішення щодо управління механічними властивостями прокату можуть бути використані при розробці АСУ ТП товстолистових станів.

Ключові слова: товстолистовий стан, механічні властивості прокату, система автоматизованого управління.

Abstract. Competitiveness of Ukrainian metal in the world market is stipulated by high technical requirements for its quality in general, including its mechanical properties. Introduction of effective systems of automated control of the mechanical properties of heavy-plate mills will significantly improve their quality. The article describes the formulation of the problem of controlling mechanical properties of heavy-plate rolled products, and mathematical models for forecasting their mechanical properties. The main technical solutions are implemented into the automated control system of mechanical properties of rolled products. The developed system of automated control of their mechanical properties is included into the APCS of heavy-plate mills rolling, as well as the software and hardware for this complex system is partially common to both components. APCS of the rolling process is functionally combined with the control system of the mechanical properties of rolled products. Five programmable controllers built on a PC, as well as monitors, a corresponding keyboard and printers are used to control these properties. For the organization of the automated system of control and management of mechanical properties there is used a «manual» organizational and technical structure. To test the developed system and its algorithms, there was created a laboratory installation which allowed to perform simulation of the automated control system of the mechanical properties of rolled products on the basis of a PC. During the simulation there was used experimental data from a real technological object and confirmed the operability of the obtained scientific and technical solutions. Stated above solutions to control the mechanical properties of rolled products can be used in the development of the APCS of heavy-plate mills.

1. Вступ

Конкурентоздатність українського металу на світовому ринку обумовлена високими технічними вимогами до якості в цілому, в тому числі до його механічних властивостей.

Впровадження у прокатному виробництві ефективних систем автоматизованого управління механічними властивостями товстолистого прокату дозволить істотно поліпшити якість прокату.

Метою цієї статті є опис системи автоматизованого управління механічними властивостями прокату на товстолистому стані і математичних моделей прогнозу механічних властивостей прокату, які використовуються в цій системі.

2. Постановка задачі управління механічними властивостями товстолистого прокату

Задача забезпечення заданих механічних властивостей товстолистого прокату (один із показників його якості) має дві основні складові:

- реалізацію технології прокатки, що дозволяє одержати задані механічні властивості листа;
- контроль у технологічному потоці якості металу, що прокатується, стосовно його механічних параметрів.

До основних показників механічних властивостей прокату відносяться: границя міцності, границя текучості, відносне видовження, ударна в'язкість при різних температурних умовах. Аналіз технології виробництва прокату на товстолизових станах (ТЛС) свідчить про суттєвий вплив хімічного складу і технологічних параметрів на механічні властивості металу. В більшості випадків враховуються такі технологічні параметри: кратність обтисків від сляба до листа, температура нагріву металу перед прокаткою, температурний режим прокатки, температура кінця прокатки, технологічна схема прокатки слябів, режим часткових обтисків, величина обтиску в наступному пропуску, режим охолодження прокату [1]. Так, наприклад, на ряді металургійних підприємств України для забезпечення потрібного рівня механічних властивостей листа регламентують температуру кінця прокатки в залежності від хімічного складу металу і товщини листів: на товстолизових станах 2250 і 2800 при виробництві листів із вуглецевих і низьколегованих сталей температуру перед двома останніми пропусками регламентують у межах від 800 до 900°C в залежності від товщини листів і вуглецевого еквівалента ($C_{ек}$), який визначається за формулами (у процентах):

$$C_{ек} = C + 0,25Mn ,$$

$$C_{ек} = C + 0,25Mn + 0,1Si ,$$

де C , Mn , Si – відповідно процентний вміст вуглецю, марганцю і кремнію. Проведені на чорнових клітках стану 2800 Череповецького металургійного комбінату дослідження показали, що прокатка низьколегованої сталі 10Г2С1 з відносними обтисками в останньому пропуску в межах 5–7% не визиває критичного росту зерна і зниження рівня механічних властивостей, якщо температура металу не перевищує 900°C [2].

Технологія прокатки деяких металів і сплавів передбачає регламентацію температурного діапазону на окремих етапах прокатки. Це характерно, наприклад, для контрольованої прокатки (КП) товстих листів. Під КП розуміється виробництво гарячекатаних виробів із регламентацією основних параметрів: температури початку і кінця деформації, її ступе-

ня і роздрібненості. Основний принцип КП полягає в застосуванні більш низької температури і більш високого ступеня обтисків в останніх пропусках, ніж при рядовій гарячій прокатці, з урахуванням того, що деформація як спосіб підвищення комплексу механічних і експлуатаційних властивостей сталі найбільш ефективна при низьких температурах [3]. З метою досягнення заданої температури прокату до початку регламентованого етапу можна використовувати установки прискореного охолодження, розташовані в лінії стану. Управління охолодженням здійснюється шляхом зміни витрати охолоджуючої рідини на одиницю довжини охолоджуваного прокату. Схемою прокатки передбачені відправка прокату після чергового пропуску через кліть до установки прискореного охолодження, операція охолодження і повернення металу до стану для подальшої прокатки [4].

На теперішній час основним видом контролю механічних властивостей прокатного листа на вітчизняних ТЛС є вибіркова перевірка зразків прокатного металу в центральній заводській лабораторії методами руйнівного контролю. Додатково до вказаного способу контролю на деяких ТЛС для окремих марок сталей здійснюється контроль механічних властивостей безпосередньо на технологічній лінії стану на ділянці відбору проб за допомогою коерцитиметра. За показами такого приладу за допомогою спеціально побудованих номограм оцінюють механічні властивості листа.

Недоліками «ручної» реалізації вибіркового контролю якості листа і переносу результатів на всю партію листів є висока ймовірність помилок виконавців, а також неврахування різноманітності механічних властивостей окремих листів партії. Застосування автоматизованої системи контролю дозволить виключити вказані недоліки, а при створенні адаптивної моделі оцінки механічних властивостей прокату по вихідних даних сляба і параметрах його прокатки забезпечить визначення механічних властивостей кожного прокатаного листа. Більш того, адаптація при роботі в реальному масштабі часу дозволить виробляти рекомендації по зміні режимів прокатки для оптимізації якісних параметрів листа.

Виходячи з вказаного вище, виконані розробки науково-технічних рішень побудови систем контролю і управління механічними властивостями товстолистого прокату, що виключають недоліки існуючого ручного контролю і управління. Для цього проведені дослідження стосовно розробки математичного опису процесу формування механічних властивостей прокату:

- 1) визначення механізму адаптації математичного опису об'єкта, який врахує перемінні характеристики об'єкта;
- 2) рішення задачі управління механічними властивостями в умовах багатозв'язності управляючих дій і різних показників механічних властивостей;
- 3) розробка структури технічних засобів, в основному на базі стандартних, яка забезпечує рішення задач відповідно до переліку 1) і 2) при дотриманні обмежень на час рішення (обумовлено протіканням технологічного процесу) і заданої точності;
- 4) розроблені алгоритми і програми засобів автоматизованого управління;
- 5) проведена ув'язка комплексу стандартних і спеціальних програмних засобів, технічного комплексу і одержано експериментальне підтвердження його функціонування на полігоні з імітаційною моделлю.

Формування механічних властивостей прокату, як витікає з опублікованих досліджень, визначається вектором початкових параметрів сляба (хімскладу, температури, розмірів) і вектором параметрів процесу прокатки і прокату (режиму обтиску, температури, кінцевих розмірів). При цьому, оскільки хімсклад сляба і його початкові розміри задані етапами металургійного циклу, що передують прокатці, досягнення заданих механічних властивостей листа може бути здійснено вибором і реалізацією відповідних параметрів нагріву і прокатки.

Основними функціями автоматизованої системи контролю і управління механічними властивостями прокату є:

1) прогноз механічних властивостей по вихідних даних сляба, що поступає на прокатку, і фактичних параметрах прокатки;

2) вибір управлінь прокаткою, які при заданих параметрах сляба забезпечили б максимальне наближення механічних властивостей прокату до заданих значень.

Реалізація цих функцій, у свою чергу, обумовлює необхідність виконання системою функцій адаптації моделей прогнозу механічних властивостей, слідкування за розкатом і супроводження його вихідною і поточною інформацією, діалогу з експлуатаційним персоналом цеху. Система контролю і управління механічними властивостями може розглядатися як частина АСУ ТП прокатки.

Організація функціонування автоматизованої системи контролю і управління механічними властивостями в основному використовує існуючу організаційно-технічну структуру «ручного» контролю і управління механічними властивостями, доповнену рішеннями по автоматизованому розрахунку, слідкуванню і супроводженню розкату, діалогом з персоналом стану, архівуванням технологічних протоколів. Для організації функціонування системи

контролю і управління механічними властивостями прокату функції АСУ ТП розширюються і доповнюються таким чином:

1) автоматизується робоче місце обліковця поста нагрівальних печей і забезпечується можливість діалогу обліковця з АСУ ТП для корекції наряд-завдання і вводу в базу даних системи фактичного хімскладу слябів, що поступають на прокатку;

2) автоматизуються робочі місця столів зачищення: забезпечується відображення даних про прокатний метал, що поступає на ділянку, можливість діалогу операторів і контролера відділу технічного контролю (ВТК) з АСУ ТП;

3) автоматизується робоче місце ножиць відбору проб: забезпечується відображення оператору і маркірувальнику інформації про маркіровку, можливість одержання документа для супроводження проб у лабораторію;

4) автоматизується робоче місце майстра поста контролю ВТК у районі відгрузки листів: відображення даних про листи, що поступають на відгрузку, в тому числі механічні властивості, що прогнозуються по кожному листу;

5) робоче місце оператора АСУ ТП додатково забезпечується можливістю вводу в систему реквізитів листів, від яких були відібрані проби для проведення механічних випробувань, вводу результатів випробувань для здійснення адаптації моделей прогнозу механічних властивостей, відображення результатів адаптації (параметрів моделей) для підтвердження оператором використання одержаних результатів;

6) для розкатів, від яких назначено відбір проб, організовується архів даних, термін зберігання яких повинен відповідати терміну процесу одержання даних механічних випробувань і вводу їх в систему для адаптації;

7) звітні документи і інформація, відображена на відповідних постах управління, доповнюються даними про прогнозовані механічні властивості.

3. Математичні моделі прогнозу механічних властивостей прокату

Застосовано метод групового обліку аргументів (МГОА), що забезпечує в порівнянні з регресійним аналізом об'єктивний характер моделювання і структурної ідентифікації об'єкта. Об'єктивність досягається тим, що при побудові моделей керуються не заздалегідь заданим числовим значенням окремих обмежень (наприклад, порогового коефіцієнта парної кореляції, критерію істотності Стьюдента), а критеріями дуже загального вигляду: критерій регулярності, мінімуму зміщення та ін. [5]. Через це як математичний апарат для побудови моделей рекомендується МГОА. Як критерій селекції (вибору структури моделі оптимальної складності) доцільно використати критерій мінімуму зміщення (n_{ζ}), що до-

зволяє вирішувати задачу відновлення закону, скритого в зашумлених експериментальних даних, і який використовується внаслідок цього для рішення задачі ідентифікації:

$$n_{зм}^2 = \sum_{i=1}^N \left(qA_i - qB_i^2 / \sum_{i=1}^N qT_i^2 \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де N – всі точки таблиці вихідних даних, q – вихідна величина, qA – значення q , розраховані по моделі, оцінки параметрів якої одержані по точках із великим значенням дисперсії вихідної величини, qB – те саме, по точках із меншим значенням дисперсії вихідної величини, qT – табличне значення перемінної.

Для побудови математичних моделей застосовано модифікований нами багаторядний алгоритм МГОА, що забезпечує свободу вибору структури «часткових описів». Даний алгоритм визначає на кожному ряді селекції структуру «часткового опису» з використанням для його побудови комбінаторного алгоритму. При цьому використані таблиці поступового ускладнення полінома для двох перемінних, приведені в [5].

Задача автоматизації контролю механічних властивостей металу може бути сформульована таким чином: здійснити полистовий контроль шляхом прогнозування механічних властивостей металу, використовуючи адаптивні математичні моделі

$$x_{jr} = F_j(\vec{Y}, \vec{Y}_0), \quad (2)$$

що забезпечують

$$\min \sum_n (x_{jr} - x_{jf})^2 / N, \quad (3)$$

де x_{jr}, x_{jf} – розрахункове (прогнозоване) і фактичне значення j -ї механічної властивості, \vec{Y}_0, \vec{Y} – вектор вихідних даних сляба і вектор параметрів прокатки, n, N – номер дослідів і кількість дослідів у виборці.

Запропонований алгоритм дозволяє проводити побудову математичних моделей прогнозу механічних властивостей прокату відповідно до постановки задачі (3) при наявності статистичних даних про прокатаний метал у результатах механічних випробувань зразків, виготовлених із прокатаних листів. Попередньо розмірність моделей прогнозу механічних властивостей може бути визначена з таких міркувань:

1) кількість моделей відповідає максимальній номенклатурі механічних властивостей, що характеризують прокат відповідно до існуючих стандартів і технічних умов (порядку 7–10 показників);

2) кількість аргументів у кожній із моделей відповідає сумі максимального числа хімічних елементів у хіманалізі сталі (3–7 параметрів), розмірів сляба і листа (товщина, ширина, 4 параметри), температури початкової, кінцевої етапів прокатки (2–4 параметри); всього до 15 аргументів.

Діапазони зміни параметрів математичних моделей визначаються як характеристиками прокатаних розкатів, так і зміною стану механічного устаткування стану у процесі прокатки, які можуть суттєво змінюватися з часом. Це пояснюється механічним зносом і зміною теплового профілю робочих валків у процесі прокатки, зміною профілювання валків після перевалки, зміною умов охолодження розкату в залежності від температури навколишнього середовища, варіацією хімічного складу прокатного металу, варіацією області вхідних змінних моделей і іншими факторами. У зв'язку з істотною нестаціонарністю стана як об'єкта управління математичні моделі, одержані при дослідженні об'єкта і використовуються при проєктуванні системи, необхідно безперервно уточнювати (адаптувати) у процесі експлуатації.

Існує достатньо багато алгоритмів уточнення моделей [6]. Одним із найбільш розповсюджених багатокрокових алгоритмів адаптації є метод найменших квадратів або його модифікації, цілком прийнятні для об'єму статистичних даних. Широке застосування в АСУ ТП одержали однокрокові алгоритми, алгоритм стохастичної апроксимації і алгоритм послідовного навчання (алгоритм Качмажа) [7]. Вони вимагають найменшого числа обчислень, однак їм притаманна відносно низька швидкість збіжності. Через це доцільно використовувати як алгоритм адаптації моделей механічних властивостей прокату при відсутності достатнього числа експериментальних даних (до їх нагромадження) і орієнтуватися на метод найменших квадратів.

4. Система автоматизованого управління механічними властивостями прокату

Розроблена за участю авторів система автоматизованого управління механічними властивостями прокату включена в АСУ ТП прокатки на ТЛС, і відповідно програмно-технічне забезпечення для цієї комплексної системи частково є загальним для обох компонент. АСУ ТП прокатки функціонально суміщена з системою управління механічними властивостями прокату. Для управління механічними властивостями прокату передбачено п'ять програмованих контролерів, побудованих на базі ПЕОМ, а також на кожному посту встановлено монітори, відповідну клавіатуру і принтери.

Алгоритми системи виконують такі функції:

1. Комплекс здійснює прийом від АСУ ТП даних про лист, що прокатується, вибір за маркою сталі групи марки, по товщині прокату – діапазону товщин, по них вибір адрес підмасивів параметрів, аргументів і даних для адаптації, визначення структур математичних моделей розрахунку механічних властивостей, вектора їх параметрів, вектора їх аргументів, проводить розрахунок за цією моделлю показників механічних властивостей (границі міцності, границі текучості, відносного подовження, ударної в'язкості).

2. Комплекс алгоритмів формування протоколів здійснює вибір граничних значень показників механічних властивостей (відповідно до існуючих стандартів і технічних умов), розрахунок граничних значень, в яких можуть знаходитися розраховані показники (із урахуванням можливих помилок прогнозу), формування і видачу протоколів якості на екрани відеотерміналів на посту управління чистовою кліттю.

3. Комплекс алгоритмів адаптації здійснює запам'ятовування виміряного показника механічних властивостей, що замінюється за результатами останніх вимірів аргументів моделі, відновлення даних, використаних при адаптації, розрахунок параметрів моделі методом найменших квадратів, запис уточнених параметрів у масиви, визначення верхнього граничного значення середньоквадратичної помилки розрахунку.

4. Комплекс алгоритмів видачі відеокADRів і забезпечення діалогу персоналу постів із системою здійснює пошук протоколу механічних властивостей за заданими реквізитами і відображення його на екрані. Даний алгоритм обслуговує робоче місце оператора відбору проб, майстра ВТК і оператора лабораторії, здійснює видачу на екран потрібного протоколу механічних властивостей і введення із клавіатури номера партії і ознак досліджень, введення із клавіатури вимірних значень показників механічних властивостей, перегляд на екрані параметрів математичних моделей показників механічних властивостей металу, видачу уточнених параметрів моделей на дисплей і на принтер.

5. Комплекс алгоритмів розрахунку рекомендацій щодо управління прокаткою з метою досягнення заданих значень механічних властивостей вирішує задачу визначення управлiнь, які забезпечують максимальне значення мінімального відхилення значень механічних властивостей від допустимих границь. Для рішення задачі використовується модифікований сімплекс-метод.

Математичні моделі показників якості відображають статистичний зв'язок показників механічних властивостей із хімічним складом плавки, розмірами сляба, листа і параметрами

режиму прокатки. Вони представляються у вигляді рівнянь множинної регресії. Для кожної групи марок сталей (у групу включаються сталі визначеної марки і відповідні визначеному стандарту або технічній умові, розрахунок показників механічних властивостей проводиться по одній математичній моделі).

У загальному вигляді математична модель показника якості має вид

$$FO = \sum_1^M \vec{B}[i] \vec{AR}[i]$$

або у векторній формі

$$FO = (\vec{B} \vec{AR}),$$

де FO – функція відгуку, \vec{B} – вектор параметрів моделі, \vec{AR} – вектор аргументів моделі, M – розмірність моделі.

Структура математичної моделі конкретного показника механічних властивостей залежить від виду показника і групи марки сталі досліджуваного металу, значення параметрів моделі залежить від товщини прокатоного металу. Структури моделей для різних груп сталей і показників знайдені за статистичними даними про вихідні параметри сляба, розміри листа, режими прокатки і результати механічних випробувань зразків, відібраних від прокатаних листів.

5. Висновки

Для перевірки розробленої системи і її алгоритмів функціонування була створена лабораторна установка, що дозволила на базі ПЕОМ виконати імітаційне моделювання системи автоматизованого управління механічними властивостями прокату. При моделюванні використані експериментальні дані з реального технологічного об'єкта, підтверджена роботоздатність одержаних науково-технічних рішень.

Викладені вище рішення по управлінню механічними властивостями прокату можуть бути використані при розробці АСУ ТП товстолистових станів.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.
2. Погоржельський В.И., Ананьевський М.А., Захаров В.И. и др. Влияние технологических режимов прокатки непрерывнолитых слябов на структуру механических свойств толстых листов. *Сталь*. 1976. № 2. С. 18–22.
3. Погоржельський В.И., Литвиненко Д.А., Матросов Ю.И. и др. Контролируемая прокатка. М.: Металлургия, 1979. 183 с.
4. Ієвлев Н.Г. Автоматическое управление ускоренным охлаждением проката на толстолистовых станах. *Металл и литье Украины*. 2017. № 4–5. С. 25–29.
5. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. К.: Наукова думка, 1986. 296 с.
6. Перельман И.И. Оперативная идентификация объектов управления. М.: Энергоиздат, 1982. 272 с.
7. Данилов Ф.А., Имедадзе В.В., Клемперт Е.Д. и др. Адаптивное управление точностью прокатки труб. М.: Металлургия, 1980. 280 с.

Стаття надійшла до редакції 03.06.2021