

DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.4

УДК 621.771

О.В. Нікулін, к.т.н., доцент, av_nikulin@ukr.net

О.П. Максименко, д.т.н., професор, 0976776379max@gmail.com

В.М. Самохвал, к.т.н., доцент, volsamokhval@gmail.com

О.О. Григориця, магістрант, grigoritsa.a@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

ГРАФІЧНА ФАКТОРИЗАЦІЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ ПРОКАТУВАННІ

Виконано узагальнену графічну факторизацію технологічних параметрів безперервної сортової прокатки, яка дозволяє визначити причинно-наслідкові зв'язки кінематичних і силових процесів, а також формозміни розкатів у виробничих умовах. Побудова графічної моделі починається з використання діаграми Ісікави з явним визначенням технологічних чинників безперервного прокатування з натяжінням. До особливостей моделі відноситься якісне визначення на дослідницькій основі впливу факторів на енергозбереження з врахуванням поздовжньої стійкості прокатки. Графічна модель може бути використана за основу в наступному аналітичному моделюванні процесу прокатування для діючих станів, забезпечуючи його адекватність.

Ключові слова: безперервне прокатування; натяжіння; графічна модель; діаграма Ісікави; факторизація технологічних чинників.

A generalized graphical factorization for the technological parameters of continuous grade rolling was performed, which allows determining the cause-and-effect relationships of kinematic and power processes, as well as changes in the shape of workpieces in manufacturing. The construction of the graphic model begins with the use of the Ishikawa diagram with a clear definition the technological factors of continuous rolling with tension. Features of the model include a qualitative determination on a research basis of the influence the factors on energy saving, taking into account the longitudinal stability of rolling. The graphical model can be used as a basis in the following analytical modeling of the rolling process for operating conditions, ensuring its adequacy.

Keywords: continuous rolling; tension; graphic model; Ishikawa diagram; factorization of technological factors.

Постановка проблеми

Прокатка металу на сучасних станах, як правило, відбувається безперервно з натяжінням смуги. Міжклітьовий натяг розкату зменшує тиск металу в осередках деформації та знижує різнотовщинність, дає можливість підвищити точність розмірів зразка, який прокатується. Якщо регулювати міжклітьові натяги за результатами науково обґрунтованих розрахунків, то можна забезпечити оптимальні, з погляду енергозбереження, умови обробки [1, 2]. Ресурсозбереження досягається на дослідницькій основі.

У теперішній час дослідження, які виконуються в університетських умовах здобувачами вищої освіти та викладачами, обмежені за часом і в ресурсах. Тому на усіх кроках їх проведення, починаючи зі складання плану робіт, повинна забезпечуватись ефективність дій. Для цього важливі різнобічність, глибина і повнота проробки матеріалів у відповідності з обраною темою роботи. Отже, пропонується використати графічне моделювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В даний час процес безперервної прокатки з натягом розглядається як складна динамічна система, яка ще не до кінця досліджена. Фізична сутність безперервної прокатки з натяжінням була представлена вже в ранніх роботах В.М. Видріна [3]. Захоплюючи здатність валків в процесі деформації, що встановився, значною мірою залежить від режиму натягу смуги, особливо в тих випадках, коли сила заднього натягу помітно перевищує силу переднього. За теоретичними уявленнями поздовжня стійкість смуги у валках, коли забезпечена стабільність прока-

тки та підтримується рівновага металу в осередку деформації, також залежить від режиму натягу смуги. У роботах [4, 5] запропоновано методику оцінки стійкості процесу, виходячи з розрахунку середньої результуючої поздовжніх сил пластично деформованого металу.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є факторизація чинників безперервної прокатки з натяжінням для забезпечення адекватності наступного моделювання. Пропонується посилення пошукової складової на основі розв'язання проблем застосуванням інноваційних технологій з використанням досить простих, але вельми наочних методів, що відрізняються визнаною ефективністю.

Виклад основного матеріалу

При науковому підході робота починається з розгляду причинно-наслідкових зв'язків між факторами (причинами), які визначають явище або процес, і їх вихідними характеристиками (наслідками). В металургії та зокрема прокатному виробництві для процесів виготовлення виробів з їх експлуатацією схему причинно-наслідкових зв'язків можна будувати відповідно до діаграми Ісікави [6]. Вона має просту структуру зв'язку елементів направленими відрізками і відображає взаємозв'язок між вирішуваною проблемою і причинами, що впливають на її виникнення (рис. 1).

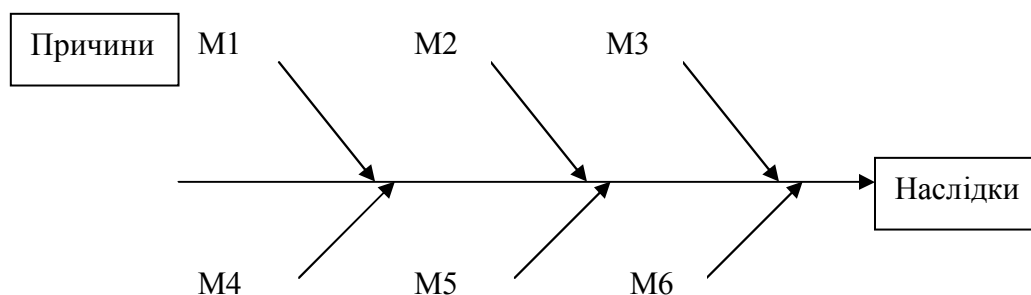


Рис. 1. Початкова схема діаграми Ісікави

Даний інструмент використовують, коли необхідно швидко впорядкувати за ключовими категоріями (можна обирати з 6М: (M1) Man — Людина; (M2) Management — Керування; (M3) Measurement — Вимірювання; (M4) Material — Матеріал; (M5) Machines — Обладнання; (M6) Manufacturing — Технологія) причини проблеми [7].

Далі відповідно до змісту дослідницької роботи проводиться перебудова початкової діаграми з переходом деяких категорій в неявну форму, вони стають «невидимими» на рисунку; по іншим категоріям, як правило, виконується декомпозиція — гілки перетворюються в дерева.

З урахуванням технологічної спрямованості досліджень категорія «людина» стає неявною тому, що передбачається залучення до робіт персоналу з достатнім рівнем вмінь і компетентностей. Відповідно до теми роботи категорія «обладнання» підрозділяється в першу чергу на групи прокатних клітей: чорнову і чистову, безперервну і послідовну. Далі самі кліті можуть підрозділятися за кількістю валків: дуо, тріо, кварто і т. ін.; за конструкцією станин тощо. У категорії «технологія» вибирається гаряча поздовжня прокатка листової сталі, сортових або фасонних профілів з одночасним використанням одного або багатьох струмків. Категорія «матеріал» підрозділяється на матеріал розкату, матеріал інструменту, мастильний матеріал і т. ін.

Початковий крок побудови діаграми причини-слідства для аналізу проблеми «Управління режимом натяжін прокатки», представлено на рис. 2.

Відповідно до побудованої діаграми Ісікави розв'язання проблеми досліджень управління режимом натяжін у конкретному процесі прокатки виконується за явними 5М причинами. Проводиться факторизація результатів досліджень, як впорядкування за чинниками та їх властивостями, відомими по темі публікацій та розробок.

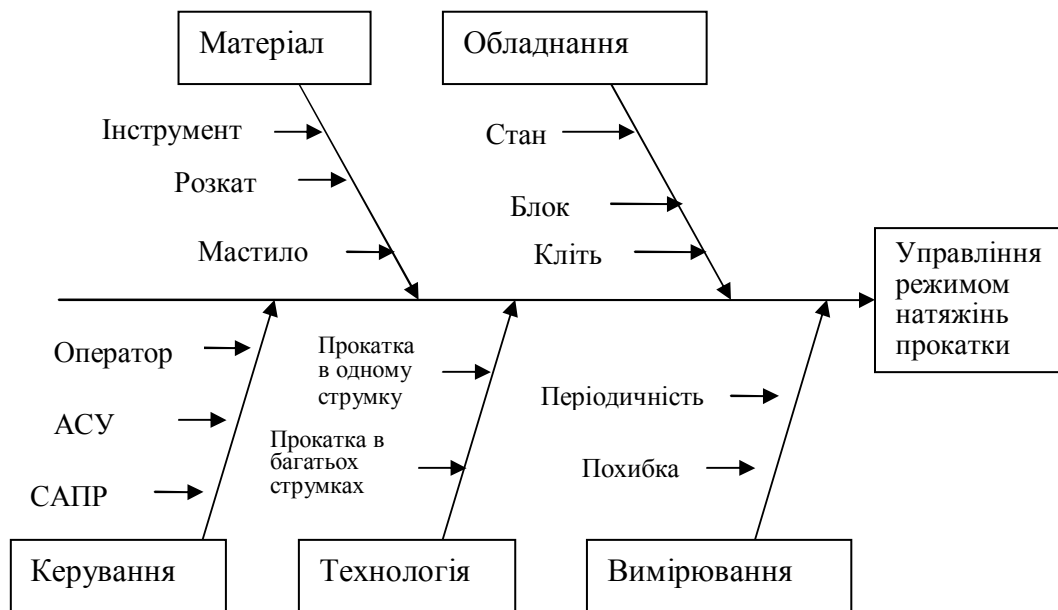


Рис. 2. Діаграма Ісікави проблеми «Управління режимом натяжін прокатки»

Матеріал. В [8] розглянуто технологічні аспекти прокатки сортових профілів з різних вуглецевих і легованих марок сталей при урахуванні константи прокатного стану. Прийнято, що основними факторами, які впливають на формозміну та кінематику процесу прокатки, є температура та фізико-механічні властивості матеріалу розкату.

В роботі [9] розглянуто вплив параметрів процесу гарячої прокатки на коефіцієнт тертя на контактні розкату з валками. Показано, що він залежить головним чином від температури металу, стану поверхонь та матеріалу валків і швидкості прокатки. Зі збільшенням швидкості прокатки коефіцієнт тертя зменшується з насиченням, тобто по досягненні певної швидкості подальше падіння практично зупиняється.

В статті [10] розглянуто захват розкату валками чистового дротяного блоку при високих швидкостях прокатки (до 140 м/с) в чистовій клітці. При моделюванні процесів заповнення осередків деформації в клітках високошвидкісних блоків слід враховувати також вплив масових сил та поздовжніх міжкліткових сил. У високошвидкісних блоках стандартного типу кут захвату звичайно не перевищує 0,3 рад при робочих швидкостях до 100 м/с. Для таких блоків розрахунковий коефіцієнт тертя звичайно не залежить від швидкості прокатки, якщо вона більше 30 м/с. При прокатуванні високолегованих, швидкоріжучих сталей, ніхромів та інших металів з високим опором деформації при захваті виникають труднощі. При заповненні осередку деформації задній натяг зменшує максимальний кут захвату, а підпор — збільшує. Масові сили, що виникають при прокатці зі швидкостями 100—120 м/с, впливають на захват східним чином.

Обладнання. Докладний аналіз [11] показує, що умови зв'язку між окремими клітками на безперервних станах можуть характеризуватися трьома головними варіантами: відсутність зв'язку — прокатка з петлею; м'який зв'язок — прокатка з однаковим натягом по всьому стані (як при однократному волочинні); жорсткий зв'язок — прокатка з натягом для створення деформації. При цьому враховується, що поздовжніх напружень стискання між клітками необхідно уникати. Обмеженням для роботи з петлею є швидкість прокатки — не більше 40 м/с. Тому таку технологію доцільно використовувати тільки на дільниці чистової групи дрібносортових станів і проміжної групи дровових станів при наявності індивідуальних приводів у прокатних клітці.

Прокатка в блоках ведеться з мінімальним натягом [11]. Причому груповий привід розраховується так, щоби від переходу до переходу гарантувався мінімальний натяг, тому що будь-який поздовжній стиск між прокатними клітками приводить до неконтрольованого згину розкату з відповідним порушенням в роботі стану.

У роботі [12] відмічено, що натяг є механічним зв'язком процесу безперервної прокатки. В статті отримані лінійні залежності випередження та натягу розкату, рівняння зв'язку безперервної прокатки, формули динамічного та статичного натягу. Вказані формули та рівняння отримані, виходячи із закону постійності об'єму металу при прокатці, та на основі виробничих і експериментальних даних. Ці формули відображають функціональну залежність між натягом, товщиною розкату, лінійною швидкістю обертання валків та часом процесу безперервної прокатки.

У статті [13] вказано, що деформація розкату між клітьми стану є більш вигідною з енергетичної точки зору, ніж деформація у валках. Проте її використання зустрічає ряд труднощів, одна з яких — керування розмірами та формою профілю по всій довжині зразка. У роботі наведені формули для розрахунку швидкісного режиму прокатки в блоках з груповим приводом. Модель враховує процеси зміцнення та релаксації металу в проміжку між клітьми стану.

Відповідно до роботи [14] високошвидкісна гаряча прокатка в дротяних блоках повинна бути віднесена до процесів, які характеризуються переважним впливом на напруження текучості температури та ступеню деформації. Зміна площі перерізу на вході до блоку є одним з найбільш суттєвих збурень, що впливають на точність катанки та режим натягів в блоці. Регулювати профіль катанки доцільно зміною міжвалкових зазорів будь-якої кліті, окрім останньої. Досягнення певної величини розширення в останній кліті досягається варіюванням параметрів прокатки в блоці (зміною площі перерізу підкату перед блоком та налагодженням клітей). Під час роботи стану калібри постійно зношуються, у зв'язку з чим відбувається зміна режиму обтиснень та рівнів натягів. Це необхідно враховувати при розробці калібровки валків, що дозволить більш раціонально використовувати валки стану.

Керування. У статті [15] розглянуто питання динамічного налагодження безперервного стану під керівництвом оператора. Своєчасне налагодження швидкісного режиму стану оператором відбувається завдяки візуальній різниці стану розкату з небезпечним для утягування натягом від слабо розтягнутого розкату. Ця відмінність полягає в тому, що коливання слабо натягнутого розкату лежать в області коливань видимого спектру, в той час коливання сильно натягнутого розкату — в області невидимого спектру. Сам розкат, в якому збільшується натяг і протікає утягування, не може служити індикатором зростання натягу. Індикатором натягу є петля, що з'явилася в сусідньому проміжку.

Серед найбільш відомих та тих, що використовуються, способів регулювання натягу в роботі [16] названий спосіб, який оснований на порівнянні току якоря головного двигуна. При цьому вимірюється та запам'ятовується величина току якоря головного привода при заправці металу до валків кожної прокатної кліті без натягу. Якщо сила току якоря головного привода при обтисненні прокату в наступній прокатній кліті змінюється, то співвідношення частоти обертання валків обох клітей змінюють до тих пір, поки сила току якоря головного привода не сягне раніш вимірянних значень. Отримане таким чином співвідношення частоти обертання валків залишається незмінним при подальшому надходженні металу. У роботі [16] велику увагу приділили явищу утворення «потовщених кінців». Дослідження показують, що середнє поздовжнє напруження в розкаті помітно зменшується з виходом прокату з перших клітей стану. Відповідно до зменшення поздовжніх сил збільшуються розміри поперечного перерізу розкату, що виходить зі стану. Показано, що температура також суттєво впливає на відхилення від табличних значень площ профілю по клітям стану.

У статті [17] отримані рівняння, які дозволяють визначити умови стійкості розкату в проміжку між валками безперервного стану та зв'язати це з параметрами налагодження режимів роботи сусідніх прокатних клітей. Зміна питомих натягів вздовж розкату та зміна його прогину у вертикальній площині являє собою динамічні перехідні процеси, пов'язані один з одним.

У роботі [18] розроблено алгоритм системи діагностики режиму натягів при прокатці на безперервному дрібносортовому стані. В алгоритмі використовується інформація про тривалість переміщень переднього та заднього торців сусідніх заготовок крізь міжклітьові проміжки при заповненні та вивільненні їх від нього. В якості додаткової інформації долучаються розрахункові значення кутів захоплення металу в клітях і середніх дотичних напружень в їх осередках деформації.

При багатонитковій прокатці в чорнових і проміжних групах безперервних станів зміна кількості розкатів, які одночасно прокатують на стані, призводить до кратній зміни секундного

об'єму металу, який проходить крізь кожну кліть, швидкісного режиму чистових клітей і зменшення виходу мірних довжин готових профілів. В роботі [19] розроблена математична модель безперервної двониткової прокатки в калібрах клітей чорнової групи безперервного дрібносортового стану 250.

Технологія. В статті [20] розроблено методику розрахунку систем калібрів овал — квадрат, шестигранник — квадрат, ромб — квадрат, овал — круг, овал — ребровий овал, овал — круг та прямокутник — квадрат. Методика заснована на використанні формули О.І. Целікова для розрахунку абсолютного розширення та враховує геометричні параметри осередку деформації, умови тертя на контакті металу з валками, форму калібру та заготовки, величину натягу розкату між клітьми стану, а також матеріал розкату. Методика може бути використана для проектування або вдосконалення процесу прокатки сортових профілів з чорних та кольорових металів.

В роботі [21] узагальнено досвід та витримані результати багатьох дослідників, причому багато з тих знань використовується й досі. Зі збільшенням натягу тиск металу на валки зменшується. Задній натяг більш ефективно впливає на зменшення тиску при прокатці. Аналіз зміни середнього тиску металу на валки та сили прокатки показує, що зменшення сили прокатки під дією натягу відбувається головним чином (92—97 %) за рахунок зменшення середнього тиску та незначно (3—8 %) за рахунок зменшення контактної поверхні.

Аналіз дослідних даних [21] показує, що тиск по ширині калібрів розподіляється нерівномірно та залежить від форми заготовки. Головний вплив на зміну характеру розподілу тиску на валки при прокатці в калібрах надає нерівномірність деформації металу по ширині калібру, що призводить до виникнення додаткових поздовжніх напружень.

Зі зростанням переднього натягу плече рівнодіючої сил в осередку деформації зменшується [21]. Положення рівнодіючої зміщується убік перерізу входу розкату до осередку деформації, проте сама рівнодіюча нахиляється вбік напрямку прокатки. Тоді, якщо плече рівнодіючої сили більше радіусу тертя в шийках валків, а рівнодіюча пройде нижче центру валка, двигун повинен перейти до генераторного режиму роботи, тобто можливий стрибок через нестабільний стан роботи. В умовах прокатки із заднім натягом плече внаслідок її нахилу може стати більше горизонтальної проекції дуги захвату, хоча точка прикладення рівнодіючої знаходиться на контактній поверхні близько до виходу з осередку деформації [21].

При значному натягу розширення стає рівним нулю і навіть від'ємним [21]. Правильне врахування впливу натягу на розширення при прокатці має важливе значення для розрахунку калібровки валків безперервного стану, для визначення оптимального режиму прокатки. Встановлені критичні значення напружень натягу сортових профілів при гарячій прокатці. З умови виконання профілю при прокатці круглих профілів вони складають 8—12 МПа, а при прокатці квадратних профілів — 12—32 МПа. З умови міцності розкату границя становить 68 МПа. Дослідження показують, що при гарячій прокатці з натягом кінцеве утягування профілю складається з двох складових: утягування в осередку деформації та між клітьми стану.

Загальний привод клітей блоків виключає можливість керування процесом шляхом зміни частот обертання валків окремих клітей, тому прокатка протікає із силами, що діють на розкат між клітьми [22]. Сутність саморегулювання процесу безперервної прокатки зводиться до підтримання секундних об'ємів металу, який проходить крізь всі кліті стану. Роботу блоку можна регулювати за рахунок зміни зазору між валками клітей та діаметра підкату. Розрахунки показали, що значення технологічних факторів, які можуть призвести до аварійної ситуації на виробництві катанки перевищують реальні значення. Аварійні ситуації виникають: 1) при виникненні надвеликого підпору; 2) при виникненні напруження натягу, що дорівнює межі текучості; 3) при досягненні значення заднього натягу, яке призведе до буксування розкату. Стійкий процес прокатки, при якому можливий процес саморегулювання, буде відбуватися при значеннях питомих натягів до декількох десятків від σ_s .

В статті [5] на основі розв'язання рівняння Кармана розроблена методика оцінювання стійкості розкату при прокатці з натягом металу. Розрахунки показали, що зі збільшенням питомого натягу стійкість розкату в валках прокатного стану зменшується, процес наближається до буксування. Отримані дані показали, що зі збільшенням питомого натягу сумарний момент

прокатки зменшується, тобто зменшуються енерговитрати на процес, проте одночасно погіршується стійкість процесу. Тобто теоретично доведено, що режим натягів слід призначати з урахуванням поздовжньої стійкості розкату.

На рис. 3 показано зміна горизонтального розміру круглого профілю діаметром 25 мм по довжині при різному неузгодженні швидкостей чистової та передчистової клітей стану [23].

При неузгодженості швидкостей клітей у 2,5 % та початковому налагодженню на номінальний розмір 25 мм профіль виходить за поля допусків. Зі збільшенням неузгодженості швидкостей різновтовщинність по довжині профілю та довжини потовщених кінців зростають.

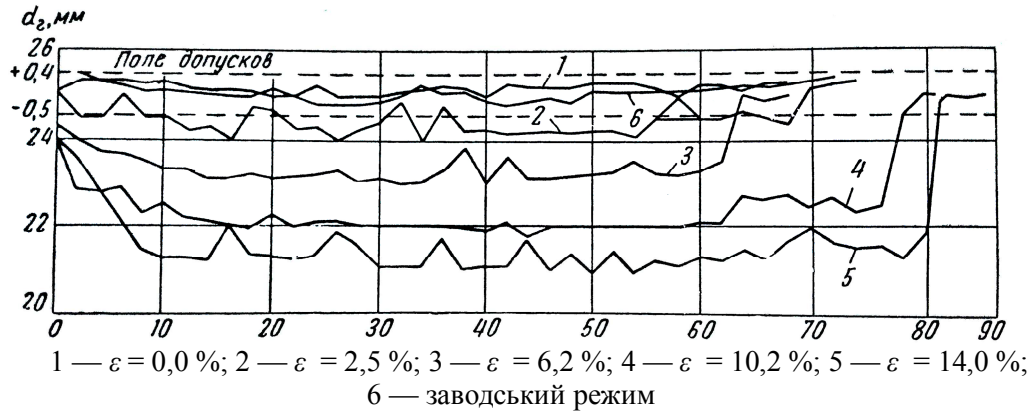


Рис. 3. Зміна горизонтального розміру чистового профілю по довжині при неузгодженості швидкостей клітей [23]

Вимірювання. В роботі [23] наведені результати математичного моделювання процесу прокатки на безперервному дротовому стані, яка дозволяє посилити вимоги до точності поперечного перерізу катанки. Модель може розраховувати деформації, навантаження (сила прокатки) та температуру матеріалу по клітям стану. Розрахунок розширення проводиться за модифікованою моделлю Шинокури, до якої авторами були додані коефіцієнти впливу напружень. При розрахунках сили прокатки (навантажень) використовували модель Шиди для розрахунку опору деформації. Для демонстрації результатів розрахунків в порівнянні з експериментальними значеннями провели розрахунки для прокатки заготовки перерізом 120×120 мм зі сталі SWRH62A на катанку діаметром 5,5 мм з кінцевою швидкістю 60 м/с. Результати вимірювання та розрахунку сили прокатки по клітям стану приведені на рис. 4.

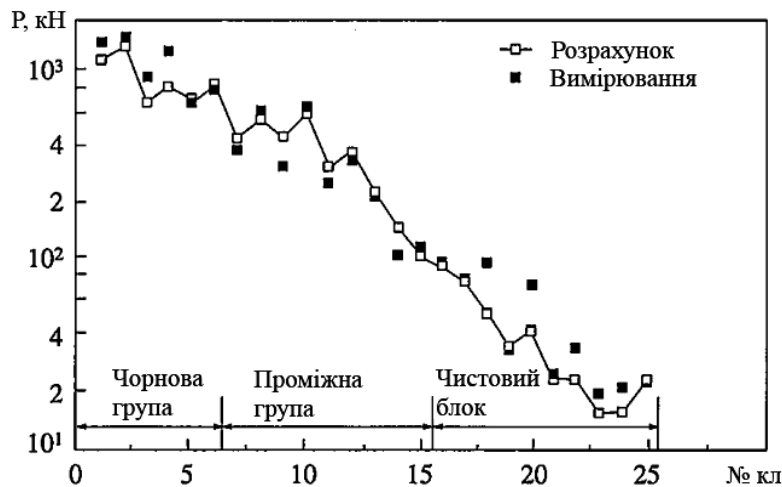


Рис. 4. Сила прокатки по клітям дротового стану [23]

Як видно, по мірі проходження металу по клітям стану сила прокатки зменшується, до-слідні та розрахункові данні узгоджені якісно та кількісно.

Результати вимірювання температури розкату на поверхні та розрахункові дані по тем-пературі металу [23] приведені на рис. 5.

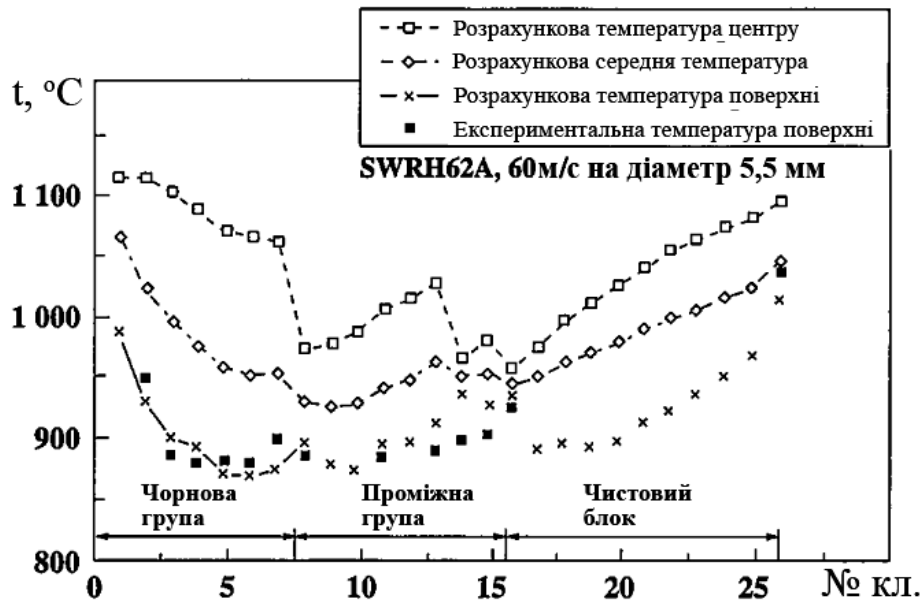


Рис. 5. Температура прокатки по клітям дротоповного стану [23]

Температура спочатку зменшується, а потім при досягненні значних величин швидкості за рахунок зменшення часу знаходження металу між валками температура розкату збільшується так, що наближається до температури вихідної заготовки.

В роботі [24] відмічено, що утворення та регулювання розмірів петлі між клітями не може забезпечити контроль точності розмірів при прокатці на сучасних сортових станах, що відображається на точності готового прокату.

Для розв'язання проблеми точності запропоновано вести в режимі «он-лайн» контроль розмірів розкату між всіма клітями стану. Це дозволяє вчасно регулювати зазор між клітями стану та змінювати швидкісний режим прокатки.

В роботі [25] досліджено величину міжклітьового натягу, яка викликана збільшенням відносної швидкості прокатки в клітях безперервної групи з калібрами системи «овал-круг». Результати досліджень показали, що навантаження на валок зменшується при збільшенні міжклітьового натягу, в той час коли крутний момент збільшується зі зростанням заднього натягу та зменшується зі збільшенням переднього натягу. Зменшення вихідної ширини заготовки в результаті дії міжклітьового натягу лінійно пов'язано зі збільшенням неузгодженості швидкостей прокатки в суміжних клітях.

Доцільно узагальнити результати попереднього аналізу впливу технологічних чинників при безперервній прокатці на сучасних станах із включенням дротяних блоків. Наочність факторизації досягається графічним моделюванням (рис. 6).

Відомі декілька методик розрахунку величини натягу між клітями стану. Проте не визначено єдиного та надійного способу знаходження цієї величини. Досі не розроблено надійного методу визначення на практиці сили взаємодії клітей безперервного стану через розкат. Найчастіше натяг визначають непрямими методами — по зміні моменту двигуна в сусідніх клітях при захваті заготовки клітями стану та при виході розкату з клітей.

При такому способі визначення натягу велику похибку вносить нерівномірність нагріву заготовки по довжині.

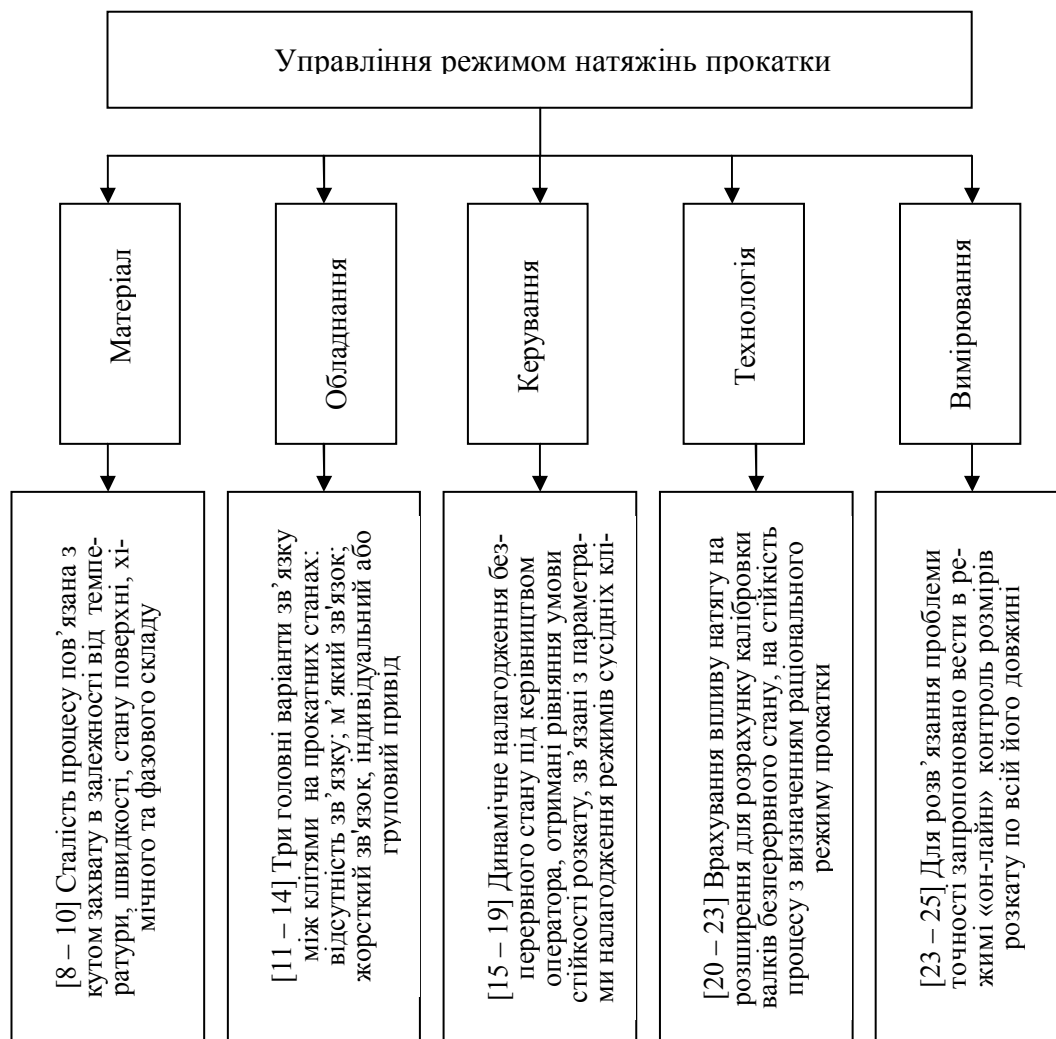


Рис. 6. Графічна факторизація впливу технологічних чинників

Тому актуальне використання сучасних теоретичних методів адекватного розрахунку напруженого стану по всій довжині розкату, наприклад за допомогою метода скінчених елементів, з подальшим визначенням впливу технологічних параметрів, наприклад умов тертя в сусідніх осередках деформації, на напружений стан металу розкату.

Висновки

Побудована діаграма Ісікави, яка дає змогу детальніше охарактеризувати умови впливу технологічних факторів гарячої прокатки профілів на режим натяжін. До можливих труднощів застосування діаграми можна віднести складність правильного визначення взаємозв'язку досліджуваної проблеми і чинників тому, що проблема є комплексною.

Для подальшої конкретизації чинників та їх впливу виконана факторизація досліджень і розробок процесів безперервного прокатування на сучасних станах. Наприклад, встановлена актуальність кількісного дослідження впливу зміни контактних умов взаємодії розкату з валками клітей стану при безперервному прокатуванні.

Актуальне використання сучасних теоретичних методів адекватного розрахунку напруженого стану по всій довжині розкату, наприклад за допомогою метода скінчених елементів, з подальшим визначенням впливу технологічних параметрів, наприклад умов тертя в сусідніх осередках деформації, на напружений стан металу розкату.

Список використаної літератури

1. Василев Я. Д., Самокиш Д. Н. Разработка энергосберегающих режимов натяжения на непрерывных станах холодной прокатки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 2. С. 34–38.
2. Василев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. М.: Металлургия, 1995. 368 с.
3. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов. Свердловск: Металлургиздат, 1960. 256 с.
4. Максименко О. П., Лобойко Д. И., Измайлова М. К. Продольная устойчивость полосы в валках с анализом контактных условий: монография. Днепродзержинск: ДГТУ, 2016. 213 с.
5. Максименко О.П., Никулин А.В., Лобойко Д.И., Хаенко Д.А. Исследование продольной устойчивости процесса при прокатке с натяжением полосы. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2020. № 2(37). С. 31–38.
6. Исикава К. Японские методы управления качеством. Сокр. пер. с англ.; под ред. А.В. Гличева. М.: Экономика. 1988. 214 с.
7. Максименко О.П., Нікулін О.В., Головняк В.В. Графічне планування дослідження впливу факторів на поздовжню стійкість прокатки. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2020. № 2(37). С. 39–42.
8. Григорьев В.К., Антипов В.Ф., Литовченко Н.В. и др. О соответствии технологических параметров процесса непрерывной многониточной прокатки профилей из разных марок стали. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1978. № 2. С. 99–102.
9. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением. [Справ. изд.]. [Пер. с нем.]. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
10. Горбанев А.А., Жучков С.М., Маточкин В.А. и др. Неустановившийся процесс прокатки в высокоскоростных проволочных блоках. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 4. С. 35–40.
11. Хензель А., Эльштетер Г. Прокатка мелкосортной стали и катанки с натяжением и без натяжения. *Черные металлы*. Перевод с немецкого. № 24. 1985. С. 21–26.
12. Zhang J.S., Zhang X.P. Formulas of tension of continuous rolling process. *Acta Metallurgica Sinica. (English Letters)*. 2007. Vol. 20. № 6. P. 403–416.
13. Белан А.К., Моторыгин М.Е. Влияние межклетевой деформации на скоростной режим прокатки в блоках с групповым приводом. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2006. № 1. С. 14–15.
14. Моторыгин М.Е., Белан А.К. Разработка модели расчета межклетевых натяжений при непрерывной прокатке в блоке клетей с групповым приводом. *ОАО «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия»*. 2007. № 9. С. 56–60.
15. Калинин В.П., Бурлачков Ю.П., Гетманец В.В. Непрерывная прокатка сортовых профилей с натяжением и резервы повышения точности. *Труды ВНИИМЕТМАШ*. 1970. Сб. 26. С. 115–126.
16. Бергер Б., Моммертц К.Х., Нойшютц Э. и др. Регулирование натяжения при сортовой прокатке. *Черные металлы. Перевод с немецкого*. № 25. 1986. С. 22–29.
17. Ермократьев В.А. Динамическая модель поперечной устойчивости полосы между клетями непрерывного стана. *Металлургическая и горнорудная промышленность. Спецвыпуск*. Сентябрь 2002. С. 284–287.
18. Шеремет В.А., Смяненко И.Н., Бабенко М.А. и др. Диагностика режима натяжений полосы в межклетевых промежутках непрерывного мелкосортного стана. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 3. С. 284–287.
19. Динник Ю.А. Математическая модель процесса непрерывной двухниточной прокатки в калибрах. Сообщение 1. *Теория и практика металлургии*. 2003. № 2. С. 71–76.
20. Кривенцов А.М. Расчет вытяжных систем калибров. *Сб. науч. трудов «Создание и исследование прокатных станов»*. М.: ВНИИметмаш. 1980. С. 108–114.
21. Чекмарев А.П., Гречко В.П., Гетманец В.В. и др. Прокатка на мелкосортных станах. М.: Металлургия, 1967. 363 с.

22. Белан А.К., Белан О.А., Шогин С.И. Механика саморегулирования процесса непрерывной прокатки в блоках клетей с групповым приводом. *Механическое оборудование металлургических заводов*. 2012. № 1 (1). С. 104–109.
23. Nogushi Yu., Okamura K., Tanabe K. Characteristics of Continuous Wire Rod Rolling and Precision Rolling System. *Nippon Steel Technical Report*. 1999. No. 80. P. 79–83.
24. Солландер Д. Новая система межклетьевого контроля размеров на проволочных и сортовых станах. *Металлургическое производство и технология металлургических процессов*. 2000. С. 64–66.
25. Bayoumi L.S., Lee Y. Effect of interstand tension on roll load, torque and workpiece deformation in the rod rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. № 145 P. 7–13.

GRAPHICAL FACTORIZATION OF THE INFLUENCE THE TECHNOLOGICAL FACTORS ON CONTINUOUS ROLLING

Nikulin A., Maksimenko O., Samokhval V., Grygorytca O.

Abstract

Metal rolling on modern mills takes place continuously with band tension. If the interstand tensions are adjusted according to the results of scientifically based calculations, it is possible to provide more rational, from the point of view of energy saving, processing conditions. A generalized graphical factorization for the technological parameters of continuous rolling the grade was performed, which allows determining the cause-and-effect relationships of kinematic and power processes, as well as changes in the shape of workpeaces in processing.

The construction of the graphic model begins with the use of the Ishikawa diagram with a clear definition the technological factors of continuous rolling with tension. Solving the problem of tension mode management research in the continuous rolling process is carried out for chosen 5M factors: (M2) Management; (M3) Measurement; (M4) Material; (M5) Machines; (M6) Manufacturing. Features of the model include a qualitative determination on a research basis of the influence the factors on energy saving, taking into account the longitudinal stability of rolling. When constructing the diagram using semantic communications, the results of a preliminary analysis the influence of technological factors during continuous rolling on modern mills with the inclusion of wire blocks are summarized. Visualization of factorization is achieved by the graphical modeling.

The graphical model can be used as a basis in the following analytical modeling of the rolling process for operating conditions in manufacturing, ensuring its adequacy. It is actual the use of modern theoretical methods of calculating the stress state along the entire length of the workpeaces. For the future, it will be the use of the finite element method with the subsequent determination of the quantitative influence of technological parameters. For example, how the friction conditions in the neighboring zones of deformation will doing on the stressed state of the rolled metal.

References

- [1] Vasylev Ya.D., Samokish D.N. (2013) Razrabotka energosberegayushchikh rezhimov natyazheniya na nepreryvnykh stanakh kholodnoy prokatki [Development of Energy-Saving Tension Modes in Continuous Cold Rolling Mills]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. [Metallurgical and mining industry]. № 2. P. 34–38. [in Russian].
- [2] Vasylev Ya.D. (1995) Inzhenernyye modeli i algoritmy rascheta parametrov kholodnoy prokatki. [Engineering models and algorithms for calculating cold rolling parameters]. M.: Metallurgy. 368 p. [in Russian].
- [3] Vydryn V.N. (1960) Dinamika prokatnykh stanov. [Rolling mill dynamics]. Sverdlovsk: Metallurgizdat. 256 p. [in Russian].
- [4] Maksimenko O.P., Loboyko D.I., Izmaylova M.K. (2016) Prodol'naya ustoychivost' polosy v valkakh s analizom kontaktnykh usloviy [Longitudinal strip stability in rolls with analysis of contact conditions]: monograph. Dneprodzerzhinsk: DSTU. 213 p. [in Russian].

- [5] Maksimenko O.P., Nikulin A.V., Loboyko D.I., Khayenko D.A. (2020) Issledovaniye prodol'noy ustoychivosti protsessa pri prokatke s natyazheniyem polosy [Investigation of the longitudinal stability of the process during rolling with strip tension]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsky State Technical University (Technical Sciences)*. № 2(37). P. 31–38. [in Russian].
- [6] Isikawa K. (1988) Yaponskiye metody upravleniya kachestvom, [Japanese Quality Management Methods]. Abbr. trans. from English; ed. A.V. Glichev. M.: Economics. 214 p. [in Russian].
- [7] Maksimenko O.P., Nikulin A.V., Golovnyak V.V. (2020) Hrafichne planuvannya doslidzhennya vplyvu faktoriv na pozdovzhnyu stiykist' prokatky [Graphic planning of the study of the influence the factors on the longitudinal stability of rolling]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsky State Technical University (Technical Sciences)*. № 2(37). P. 39–42. [in Ukrainian].
- [8] Grigoriev V.K., Antipov V.F., Litovchenko N.V. etc. (1978) O sootvetstvii tekhnologicheskikh parametrov protsessa nepreryvnoy mnogonitochnoy prokatki profiley iz raznykh marok stali. [On the conformity of the technological parameters the process of continuous multi-thread rolling of profiles from different steel grades]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. [Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy]*. № 2. P. 99–102. [in Russian].
- [9] Henzel A., Spittel T. (1982) Raschet energosilovykh parametrov v protsessakh obrabotki metallov davleniyem. [Calculation of energy-power parameters in metal forming processes] – [Trans. from German]. M.: Metallurgy. 360 p. [in Russian].
- [10] Horbanev A.A., Zhuchkov S.M., Matochkin V.A. etc. (2008) Neustanovivshiysya protsess prokatki v vysokoskorostnykh provolochnykh blokakh. [Unsteady rolling process in high-speed wire blocks]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. [Metallurgical and mining industry]*. № 4. P. 35–40. [in Russian].
- [11] Henzel A., Elshteter G. (1985) Prokatka melkosortnoy stali i katanki s natyazheniyem i bez natyazheniya [Rolling of low-grade steel and wire rod with and without tension]. *Chernyye metally [Ferrous metals]*. Trans. from German. № 24. P. 21–26. [in Russian].
- [12] Zhang J.S., Zhang X.P. (2007) Formulas of tension of continuous rolling process. *Acta Metallurgica Sinica. (English Letters)*. Vol. 20. NR 6. P. 403–416.
- [13] Belan A.K., Motorygin M.Ye. (2006) Vliyaniye mezhkletevoy deformatsii na skorostnoy rezhim prokatki v blokakh s gruppovym privodom [Influence of interstand deformation on the high-speed mode of rolling in blocks with a group drive]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova [Bulletin of MSTU im. G.I. Nosov]*. № 1. P. 14–15. [in Russian].
- [14] Motorygin M.Ye., Belan A.K. (2007) Razrabotka modeli rascheta mezhkletevykh natyazheniy pri nepreryvnoy prokatke v bloke kletey s gruppovym privodom [Development of a model for calculating interstand tensions during continuous rolling in a block of stands with a group drive] *OAO «Chermetinformatsiya». Byulleten' «Chernaya metallurgiya». JSC "Chermetinformatsiya" [Bulletin "Ferrous Metallurgy"]*. № 9. P. 56–60. [in Russian].
- [15] Kalinin V.P., Burlachkov Yu.P., Getmanets V.V. (1970) Nepreryvnaya prokatka sortovykh profiley s natyazheniyem i rezervy povysheniya tochnosti [Continuous rolling of sections with tension and reserves for increasing accuracy]. *Trudy VNIIMETMASH [Proceedings of VNIIMETMASH]*. Col. 26. P. 115–126. [in Russian].
- [16] Berger B., Mommertz K.H., Neuschütz E. et al. (1986) Regulirovaniye natyazheniya pri sortovoy prokatke [Tension control for sectional rolling]. *Chernyye metally [Ferrous metals]*. Trans. from German. № 25. P. 22–29. [in Russian].
- [17] Ermokratiev V.A. (2002) Dinamicheskaya model' poperechnoy ustoychivosti polosy mezhdru kletyami nepreryvnogo stana [Dynamic model of transverse stability of a strip between the stands of a continuous mill]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Spetsvypusk. Sentyabr' [Metallurgical and mining industry]*. Special issue. P. 284–287. [in Russian].
- [18] Sheremet V.A., Smiyachenko I.N., Babenko M.A. etc. (2003) Diagnostika rezhima natyazheniy polosy v mezhklet'yevykh promezhnutkakh nepreryvnogo melkosortnogo stana [Diagnostics of the strip tension regime in interstand gaps of a continuous small-section mill]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*. № 3. P. 284–287. [in Russian].

- [19] Dynnyk Ju.A. (2003) Matematicheskaya model' protsessa nepreryvnoy dvukhnitochnoy prokatki v kalibrakh. Soobshcheniye 1. [Mathematical model of the process the continuous double-strand rolling in gauges. Message 1.] *Teoriya i praktika metallurgii. Theory and practice of metallurgy*. № 2. P. 71–76. [in Russian].
- [20] Kriventsov A.M. (1980) Raschet vytyazhnykh sistem kalibrov [Calculation the extraction systems of rolling gauges]. Sb. nauch.trudov «Sozdaniye i issledovaniye prokatnykh stanov» [Col. scientific works "Creation and research of rolling mills"]. Moscow: VNIIMETMASH.. P. 108–114. [in Russian].
- [21] Chekmarev A.P., Grechko V.P., Getmanets V.V. and others (1967) Prokatka na melkosortnykh stanakh [Rolling on small-section mills]. M.: Metallurgy, 363 p. [in Russian].
- [22] Belan A.K., Belan O.A., Shogin S.I. (2012) Mekhanika samoregulirovaniya protsessa nepreryvnoy prokatki v blokakh kletey s gruppovym privodom [Mechanics of self-regulation process continuous rolling in blocks of stands with a group drive]. *Mekhanicheskoye oborudovaniye metallurgicheskikh zavodov. [Mechanical equipment of metallurgical plants]*. № 1 (1). P. 104–109. [in Russian].
- [23] Nogushi Yu., Okamura K., Tanabe K. (1999) Characteristics of Continuous Wire Rod Rolling and Precision Rolling System. Nippon Steel Technical Report. NR 80. P. 79–83.
- [24] Sollander D. (2000) Novaya sistema mezhklet'yevogo kontrolya razmerov na provolochnykh i sortovykh stanakh [New system of inter-stand size control on wire and bar mills]. *Metallurgicheskoye proizvodstvo i tekhnologiya metallurgicheskikh protsessov [Metallurgical production and technology of metallurgical processes]*. P. 64–66. [in Russian].
- [25] Bayoumi L.S., Lee Y. (2004) Effect of interstand tension on roll load, torque and workpiece deformation in the rod rolling process. *Journal of Materials Processing Technology*. NR 145, P. 7–13.