

наміки»), всі вони свідчать про неможливість перебігу реакцій (1) і (3) при температурах реального процесу у відновних печах, а також про можливість перебігу реакції (2) при температурах до  $657,454 \div 777,545^{\circ}\text{C}$  і реакції (4) при температурах вище  $696,993 \div 749,699^{\circ}\text{C}$  (згідно формул автора числові значення дещо інші). Однак, враховуючи температури перебігу реакції Белла–Будуара, перебіг реакції (2) за літературними даними, вірогідно, буде неможливим.

Через те, що отримані значення температур для відновних реакцій (1)–(4) відрізняються одне від одного у кожному випадку як за прямим, так і за непрямим методами, необхідно провести подібні дослідження за власними термодинамічними рівняннями, порівнявши отримані значення із значеннями, що були отримані за власними рівняннями автора для прямого методу.

УДК 621.771.23.011.001.5

**В. Г. Раздобреєв, К. Ю. Ключніков, О. І. Лещенко, Д. Г. Паламар**

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної Академії Наук України,  
м. Дніпро

## **АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛУ ПРИ ДЕФОРМАЦІЇ ШТАБИ У ЗГИНО-РОЗТЯГУВАЛЬНОМУ ПРИСТРОЇ**

Процес прокатки-волочіння застосовується для виробництва різного ряду фасонних профілів складної конфігурації, у тому числі тонкостінних, стрічкових і профілів періодичного перерізу. Цей процес при виготовленні, наприклад, профілів стрічкового типу в порівнянні з процесами волочіння у монолітних волоках або холодною прокаткою профілів має суттєві переваги: менші енергетичні витрати, більша інтенсивність одиничних деформацій, більша технологічна гнучкість, скорочення кількості підготовчих операцій та інш. Однак наявність тягового зусилля обмежує сортамент профілів, що виготовляються за компактністю їх поперечного перерізу. Так при виробництві профілів стрічкового типу з співвідношенням ширини до товщини більш 1,5-2 у зв'язку наявності напружень, що розтягують, змінюється напружено-деформований стан в об'ємі осередку деформації та зменшується пластичність металу майже до нуля, а профіль по кромкам руйнується. Так, наприклад, в процесі холодного волочіння дроту в результаті складної дії пластичної деформації, тертя металу об стінки волоки і техно-

логічних чинників у готовому виробі виникають внутрішні залишкові напруження. Встановлено, що ці напруження в периферійному шару дроту є розтягуючі, а в центральному – стискаючі [1, 2]. Щоб усунути шкідливий вплив розтягуючих залишкових напружень, необхідно або їх зменшити, або перевести в стискаючі напруження, які підвищують працездатність дроту. З цією метою в практиці дротового виробництва застосовують два методи: термічний і механічний. Перший полягає в низькотемпературній відпустці (при +250...350 °С) або індукційному нагріванні поверхні дроту; другий має кілька різновидів, з яких найбільш раціональний є правка металу у холодному стані. В процесі правки при протягуванні дроту через систему обертових роликів дрот піддається змінному згину, відчуваючи пружно-пластичну деформацію, в результаті якої змінюється напружений стан дроту. В результаті згинів дроту при правці відбувається зміна напруженого стану дроту, при якому зменшуються або нівелюються шкідливі залишкові напруження розтягнення в поверхневому шарі дроту і виникають залишкові напруження стиску, що призводить до значного підвищення працездатності дроту і виробів з неї. Застосування знакозмінного згину при виробництві профілів стрічкового типу волочінням в роликівих волоках дозволяє отримувати більш рівномірний розподіл напруженого стану металу, а також нівелювати розтягуючі напруження на крайках готового профілю. Це в свою чергу дозволить підвищити якість і геометричні розміри профілів стрічкового типу, що виробляються. Поєднання цих двох процесів холодного деформування: прокатки-волочіння у роликівих волоках і правки профілів стрічкового типу через роликівий згино-розтягувальний пристрій (ЗРП) дозволить комплексно вирішувати проблему забезпечення вітчизняних машинобудівних і приладобудівних підприємств точними профілями широкого розмірного сортаменту.

Задача досліджень полягала в послідовному аналізі напруженого стану металу на всьому протязі фактичного осередку деформації з урахуванням зовнішніх зон за допомогою розробленої та перевіреної на адекватність в Інституті чорної металургії математичної моделі розрахунку напружено-деформованого стану металу [3]. Для моделювання знакозмінної деформації металу згином з розтягуванням використовували одноплщинний трьохроликівий ЗРП з вертикальним розташуванням роликів. Параметри моделювання були прийняті з урахуванням можливостей технологічного обладнання прокатної лабораторії ІЧМ. Моделювання пружно-пластичного знакозмінного згину металу у системі SolidWorks Simulation включає наступні етапи:

- 1) налаштування моделі – створення кінцево-елементної моделі штаби, яка розміщується між верхніми та нижнім роликами;

- 2) вертикальне переміщення натискного нижнього ролику вгору у робоче положення з забезпеченням фіксації заданої величини переміщення;
- 3) прикладання сили тяжіння до системи за відсутності руху роликів;
- 4) надання швидкості обертання роликів для моделювання руху штаби за рахунок сил тертя між нею та роликами;
- 5) оцінка пружного розвантаження матеріалу після виходу з ЗРП.

Перший і третій етапи – динамічні із завданням поступального та обертального рухів роликів ЗРП, а решта – статичні без завдання руху роликів.

Для опису контактної взаємодії між роликами та штабою використовувалися вбудовані можливості системи SolidWorks Simulation, які дозволяють враховувати статичний та динамічний коефіцієнти тертя. За відсутності дотичних переміщень у контактній парі, що відповідає переміщенню натискного ролику вгору, використовується статичний коефіцієнт тертя, що дорівнює 0,25, а після початку руху штаби – динамічний, рівний 0,12. Матеріал штаби розмірами 5,2x6,01 мм – сталь марки Ст.08 з властивостями, які отримали при випробуванні зразків. Відстань між центрами осей верхніх опорних роликів дорівнювала  $L=70$  мм, а діаметр роликів  $D_p=36$  мм, зміщення натискного ролику по вертикалі на відстань 4 мм. Також в розрахунку використовували наступні характеристики матеріалу штаби: щільність  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>; коефіцієнт Пуансону  $\nu=0,3$ ; модуль пружності першого роду  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа. Модель деформованого середовища – пружно-пластична. Між нижнім натискним роликом та нижньою поверхнею штаби визначено контактну взаємодію з коефіцієнтом тертя 0,25. Розрахунки розподілу напружень по товщині штабі проводили на довжині штаби 150 мм через кожні 3 мм при проходженні через трюхроликовий ЗРП.

За результатами моделювання були побудовані графіки розподілу напружень  $\sigma$  у всіх поперечних перерізах штаби по її довжині. З аналізу отриманих даних встановлено, що розподіл напружень, які розтягують і стискають по товщині штаби, має складний характер та є суттєво нерівномірним. Наприклад, на відстані 40 мм до першого опорного ролику ЗРП у верхньому шару штаби формуються максимальні величини напружень, що стискають і становлять  $-155$  МПа, а на нижньому шару штаби, що розтягують з показниками до  $+348$  МПа. Перепад напружень по товщині штаби від верхнього шару до нижнього шару прокату складає  $+193$  МПа, тобто превалюють напруження, що розтягують.

Максимальні значення напружень, що стискають верхній шар штаби, які утворюється під першим опорним роликом дорівнюють  $-654$  МПа. На висоті від верхнього

шару штаби 2,6 мм значення напружень, що стискають дорівнюють 0 МПа та відбувається зміна знаку напружень з «-» (стискаючі) на «+» (розтягуючі). Максимальні величини напружень, що розтягують нижній шар штаби у цьому перерізі досягають +616 МПа. Але в цьому випадку перепад напружень по товщині штаби від верхнього шару до нижнього шару прокату складає -38 МПа, і вже превалюють напруження, що стискають.

Рівномірний розподіл напружень, що розтягують по товщині штаби знаходиться на рівній відстані (17,5 мм) від осі першого опорного ролика до осі другого натискного ролика. При цьому величина цих напружень, які розтягують по всій товщині штаби зменшується до +235 МПа. Також відмічено, що на цьому перерізі відсутні напруження, що стискають.

Аналіз даних графіку розподілу напружень по товщині штаби показав, що під натискним роликом у верхніх шарах металу формуються напруження, що розтягують з максимальним значенням на верхньому шару штаби +616 МПа, а на нижньому шару – що стискають з максимальною величиною -654 МПа в процесі деформування в ЗРП.

Таким чином, моделювання процесу деформації штаби в ЗРП спостерігається циклічна зміна як знаку напружень так і величини цих напружень, тобто призводить до суттєвої нерівномірності повздовжніх напружень за товщиною штаби.

Після того, як штаба вийшла з ЗРП відбувається зняття тиску на штабу, тобто проходить пружне розвантаження штаби, що призводить до зниження і перерозподілу внутрішніх напружень.

Результати моделювання показали, що після пружного розвантаження відбувається зміна знаку напружень: в верхніх шарах штаби спостерігаються залишкові напруження, що стискають з максимальним значенням -468 МПа, а на нижньому шару – що розтягують з максимальним значенням +439 МПа, тобто спостерігається врівноваження залишкових напружень верхніх та нижніх поверхонь штаби. Порівняння між собою максимальних значень напружень, які виникають в процесі знакозмінної деформації під натискним роликом та після ЗРП показує, що після пружного розвантаження вони зменшуються в середньому у 1,4 рази не залежно від знаку напружень.

### **Список літератури**

1. Житков Д.Г. Стальные канаты для подъемно-транспортных машин / Д.Г. Житков, И.Т. Поспехов. – М.: Металлургиздат, 1953. – 240 с.

2. Перлин И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин. – М.: Металлургиздат, 1957. – 336 с.

3. Воробей С.А. Особенности течения и напряженного состояния металла при его деформации в процессе получения профилей ленточного типа прокаткой-волочения / С.А. Воробей, В.Г. Раздобреев, К.Ю. Ключников, А.П. Лохматов, И.В. Сикачина, Л.П. Барышева // Сб. научн. трудов ИЧМ: «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепропетровск: «ВІЗІОН» – 2011. – Выпуск 23. – С. 174-184.

УДК 669.18

**В. О. Рубан, О. М. Стоянов, Є. В. Синегін, К. Г. Нізяєв**

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

### **АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЕНЕРГЕТИЧНИХ АСПЕКТІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО ПРИСТРОЮ ПРИ ОБРОБЦІ СТАЛІ НА УСТАНОВЦІ «КІВШ-ПІЧ»**

На сучасному етапі розвитку металургії якість металопродукції значною мірою залежить від ефективного позапічного рафінування сталі, що, в свою чергу, обумовлює збільшення тривалості перебування металу в ковші та супроводжується зниженням його температури. Навіть за умов мінімальних тепловтрат під час обробки на установці «ківш-піч» необхідність забезпечення параметрів розливання вимагає підвищення температури випуску, що призводить до додаткових витрат електроенергії. Разом з тим, навіть в умовах які забезпечують мінімальні витрати теплоти при обробці на установці «ківш-піч», для забезпечення необхідних параметрів розливання сталі, температуру випуску потрібно дещо підвищувати, що неминуче призводить до додаткових витрат електроенергії [1, 2].

Загальний рівень тепловтрат при позапічній обробці сталі залежить від комплексу виробничих чинників, серед яких особливо важливими є температура та тривалість випуску, стан і теплоізоляційні властивості футеровки ковша, витрати матеріалів, параметри продування інертним газом, а також тривалість виконання технологічних операцій у ковші.

Сучасні підходи до компенсації теплових втрат під час обробки рідкого металу на установці «ківш-піч» передбачають контрольоване дозоване підведення теплоти з метою мінімізації перегріву сталі на всіх етапах позапічної обробки. Одним із таких рішень є використання енергії електричної дуги, сформованої трьома графітованими