

Выводы. Представленный интерактивный программный комплекс может быть использован для формирования новых технологических процессов и расчета технологических параметров импульсных процессов, а также эффективен при оценке технологичности листовых деталей при их изготовлении импульсными нагрузками [4].

Разработанный интерактивный программный комплекс апробирован в учебном процессе в дипломном проектировании магистров при проектировании технологии опытных деталей авиационных двигателей.

Список литературы: 1. *Борисевич В. К.* Тенденции и проблемы развития импульсных технологий [Текст] / *В. К. Борисевич* // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і літакобудуванні: тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія. – 2002. – С. 16-20. 2. *Сироджа И. Б.* Структурно-аналитический метод распознавания образов с разнотипными признаками [Текст] / *И. Б. Сироджа* // Математические методы анализа динамических систем. – Х. – 1981. Вып. 5. – С. 91-107. 3. *Третьяк В. В.* Объектный подход к проектированию ресурсосберегающих импульсных технологий [Текст] / *В. В. Третьяк* //Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. № 11(47). – С. 245-254. 4. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма «Інтерактивний програмний комплекс класифікації листових деталей для виготовлення імпульсними технологіями» / В. В. Третьяк, А. И. Долматов, Л. А. Филипповская, Ю. О. Невешкин, А. В. Онопченко //№50070, Дата реєстрації 08.07. 2013.

Bibliography (transliterated): 1. Borisevich V. K. Tendentsii i problemyi razvitiya impulsnyih tehnologiy [Tekst] / *V. K. Borisevich* // Udoskonalennya protsesiv I obladnannya obrobki tiskom v metalurgiyi I ItakobuduvannI: tematichniy zbIrnik naukovih prats. – Kramatorsk: Donbaska derzhavna mashinobudIvna akademIya. – 2002. – P. 16-20. 2. Sirodzhia I. B. Strukturno-analiticheskiy metod raspoznavaniya obrazov s raznotipnyimi priznakami [Tekst] / *I. B. Sirodzhia* // Matematicheskie metodyi analiza dinamicheskikh sistem. – H. – 1981. Vyip. 5. – P. 91-107. 3. Tretyak V. V. Ob'ektnyyi podhod k proektirovaniyu resursosberegayuschih impulsnyih tehnologiy [Tekst] / *V. V. Tretyak* //Aviatsionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya. – 2006. No 11(47). – P. 245-254. 4. SvIdotstvo pro reestratsIyu avtorskogo prava na tvIr «Komp'yuterna programa «Interaktivniy programniy kompleks klasifikatsii listovih detaley dlya vigotvleniya impulsnimi tehnologiyami» / *V. V. Tretyak, A. I. Dolmatov, L. A. Filipkovskaya, Yu. O. Neveshkin, A. V. Onopchenko* // No 50070, Data reestratsii 08.07. 2013.

Поступила (received) 05.02.2012

УДК 628.16:621.981.3

О. І. ТРИШЕВСЬКИЙ, докт. техн.наук, проф., ХНТУСГ ім. П.Василенка;
М. В.САЛТАВЕЦЬ, інженер, ХНТУСГ ім. П. Василенка, Харків

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРОКАТКИ

Викладені результати теоретичних досліджень моделювання теплового стану смуги з використанням надшвидкісного охолодження (UFC) для підвищення ефективності процесів прокатки тонкого листа. Отримані дані зіставлені з результатами експериментальних досліджень французьких дослідників.

© О. І. Тришевський, М. В.Салтавець, 2014

Реконструкція теплового поля цих досліджень показала неможливість використання ці результати для проектування реальних процесів прокатки, у зв'язку з чим рекомендовано користуватися розробленою авторами методикою математичного моделювання.

Ключові слова: гаряча прокатка, полоса, математична модель, тепловий стан, зверхшвидкісне охолодження.

Вступ. Відомо, що з метою скорочення часу технологічного процесу і економії енергетичних витрат, розроблено устаткування для надшвидкісного охолодження листа (ULTRA FAST COOLING – UFC) на ділянках перед чистовою групою клітей і після чистової групи перед моталкою [1]. Процес UFC, наприклад, застосовано на металургійному заводі в місті Карлам (Франція). Передбачено використання такого процесу при реконструкції існуючого прокатного обладнання на інших металургійних заводах Європи.

На Україні не існує прокатних станів V покоління, а також сучасних методів проектування технологічного процесу прокатки. Для реконструкції існуючих і створення новітніх станів, необхідно відпрацювати методики проектування окремих ділянок технологічного процесу, які є на станах V покоління.

Аналіз останніх досліджень та літератури. Оскільки в новій технології надзвичайно важливою складовою частиною є примусове охолодження полоси під час процесу прокатки, значний інтерес представляє робота [1], в якій описано лабораторну установку для надшвидкісного охолодження полоси. Вказано кількість форсунок, відстань між форсунками і, навіть, відстань між рядами форсунок. Приведено графіки падіння температури поверхонь (верхньої і нижньої), а також середини зразка полоси товщиною 20 мм, що охолоджували на лабораторній установці.

Однак, при спробі скористатися наведеною в [1] інформацією, виникає дуже багато запитань, а ціна відповіді на них розробників технології виявилась зовеликою навіть для крупних вітчизняних машинобудівних заводів, таких, як, наприклад, НКМЗ.

Для прискорення вирішення питань створення вітчизняної технології та устаткування для надшвидкісного охолодження полоси між чорною і чистовою групою клітей в роботі [2] розроблено математичні моделі і пакети програм на C++ для їх реалізації.

Мета досліджень, постановка проблеми. Для відпрацювання надійної методики проектування ділянки нового технологічного процесу при прокатці листа необхідно вирішити декілька задач. Перш над усе – шляхом рішення тестових задач потрібно доказати можливість математичного моделювання елементів нових технологічних процесів прокатки. Встановити достовірність інформації про надшвидкісне охолодження, наведену у іноземній технічній

літературі та можливість її використання на практиці. Враховуючи високі складність і вартість натурних експериментів, результати теоретичних досліджень треба зіставити з експериментальними даними, отриманими дослідниками надшвидкісного охолодження полоси у Франції [1].

Матеріали досліджень. Перша тестова задача полягає у математичному моделюванні ділянки нового технологічного процесу надшвидкісного охолодження полоси, з вихідними даними подібними, до наведених у роботі [1].

Вихідні дані: товщина листа на виході з чорновий кліті – 20 мм; температура листа – 1030°C; швидкість транспортування полоси до чистової кліті – 4 м/хв; відстань від чорнової кліті до ділянки UFC – 3 м.

Обмеження на керуючі впливи: довжина ділянки UFC – 4 м; – температура на вході в чистову кліть – 830°C; – інтенсивність охолодження верхньої і нижньої поверхні однакові; – різниця температури по перетину листа на вході в чистову кліть не повинна перевищувати 10°C.

Потрібно визначити таку інтенсивність охолодження, що забезпечує задані умови і мінімальну відстань між чорною і чистовою клітьми.

Результати рішення першої тестової задачі, виконаного на основі роботи [2], представлено на рис.1. В математичній моделі використовували значення теплофізичних характеристик полоси для сталі Ст.Зсп.

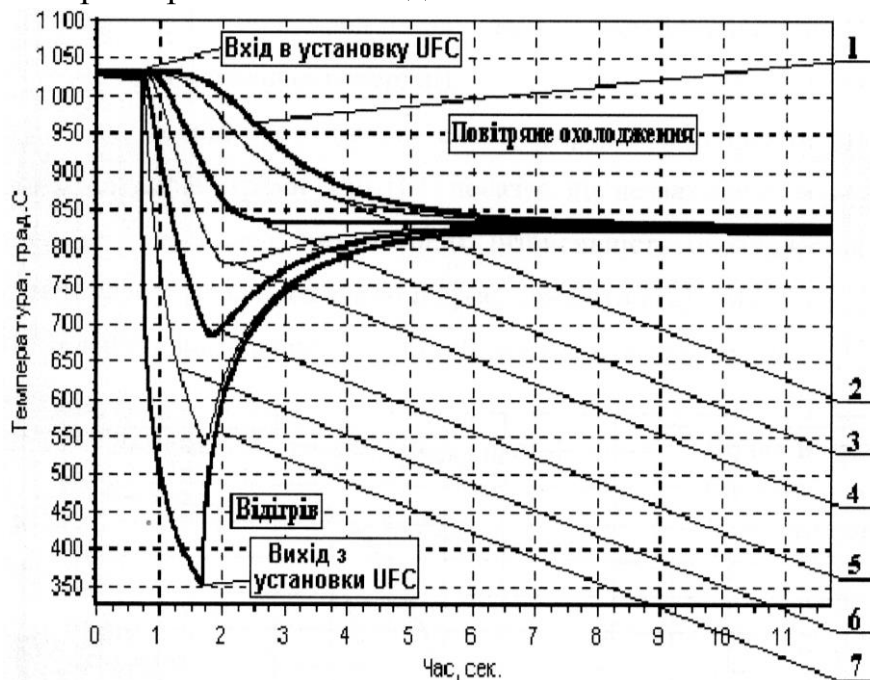


Рис. 1 – Теплове поле полоси товщиною 20 мм при UFC: 1 – середина полоси; 2 – відстань 7,2 мм від поверхні; 3 – 4,8 мм від поверхні; 4 – 3,6 мм від поверхні; 5 – 2,4 мм від поверхні; 6 – 1,2 мм від поверхні; 7 – поверхня полоси.

Як видно з графіків, за рахунок UFC, на ділянці довжиною 4 м відбувається зниження температури листа з 1030°C до 830°C.

При цьому, температура верхньої і нижньої поверхонь на виході з UFC складає 350°C. Температуру середини листа за час 1 с. UFC практично не змінює. Характер спаду температури по перетину листа істотно залежить від відстані до поверхні, що охолоджується. Природно, що чим ближче розташований шар до поверхні листа, тим інтенсивніше відбувається його охолодження.

Після виходу полоси з установки UFC на рольганг, починається процес відігрівання поверхні полоси і її підповерхневих шарів. У середині листа спостерігається зворотний процес – охолодження глибинних шарів полоси. У шарах на глибині 4,8 мм від верхньої і нижньої поверхонь, через 1 с. після виходу з установки UFC, відбувається стабілізація температури. Вона залишається майже незмінною на ділянці повітряного охолодження (рольганг).

Максимальна різниця температури, обумовлена технологією (10°C), по перетину листа досягається через 9 с. після виходу полоси з чорнової кліті, що відповідає ділянці між чорною і чистою клітями довжиною 36 м. Відстань між клітями може бути скорочено до 32 м з урахуванням того, що через 8 с. різниця температури по перетину полоси складає 11°C.

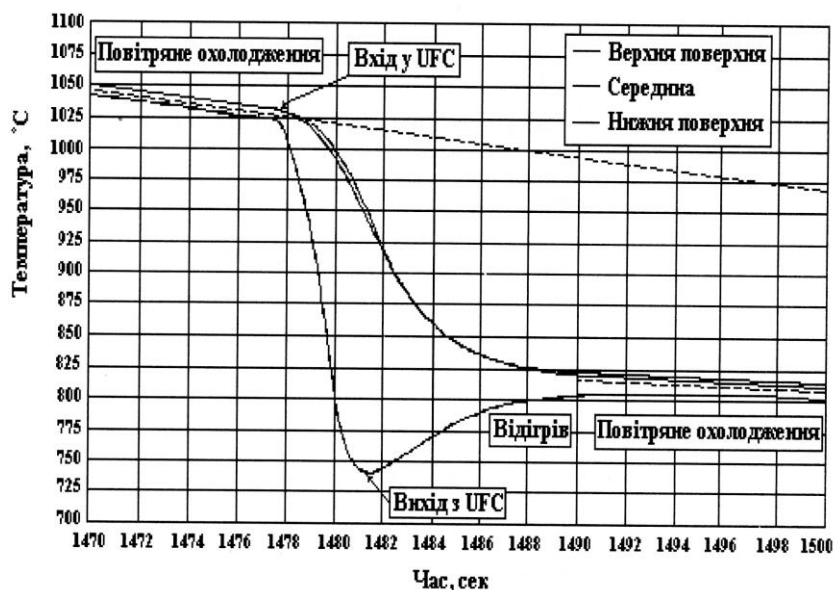


Рис. 2 – Зміна температури в прокаті товщиною 20 мм на лабораторній установці за допомогою пристрою для охолодження з розподілом води верх/низ – 50/50 (копія рис. 4 з роботи [1])

Таким чином, показано, що здійснення надшвидкісного охолодження цілком реально. Природно, що розрахунки повинні бути доповнені експериментальними дослідженнями конструкцій для подачі води на полосу. У цьому зв'язку становлять великий інтерес дослідження, виконані в рамках

пілотного проекту по створенню першої установки надшвидкісного охолодження [1]. Однак є невідповідності в описі, щодо тиску який використовується в системі подачі охолоджувача (12 і 3 бар). Не зрозумілий і тип охолодження – водяне, водно – повітряне або комбіноване (різне для верхньої і нижньої поверхні).

Крім того, досвід проектування систем керування тепловим станом об'єктів з розподіленими параметрами [3–5] показує, що незважаючи на розподіл води для охолодження полоси верх/низ – 50/50, інтенсивність охолодження знизу значно менша ніж зверху. Внаслідок цього на рис. 4 роботи [1] (див.рис.2) температура нижньої поверхні листа в процесі UFC збігається з температурою середини листа.

На рис. 3 переставлено результати другого експерименту з охолодження полоси (рис. 5 з роботи [1]).

Як видно з рис. 3, температура нижньої поверхні через 4 с. після виходу з установки UFC залишається майже незмінною протягом 12 с.

Подібний характер зміни температури ідентичний зміні температури підповерхневого шару полоси розташованому від поверхні на відстані 4,8 мм (рішення першої тестової задачі, рис. 1).

Крім того, характер зміни температури так званої "верхньої поверхні" рис.3 (рис. 5 з роботи [1]) ідентичний змінам температур підповерхневих шарів полоси, розташованих на відстані 1,2 мм від поверхні – крива 6; 2,4 мм від поверхні – крива 5; 3,6 мм від поверхні – крива 4 (див. рішення першої тестової задачі, рис. 1).

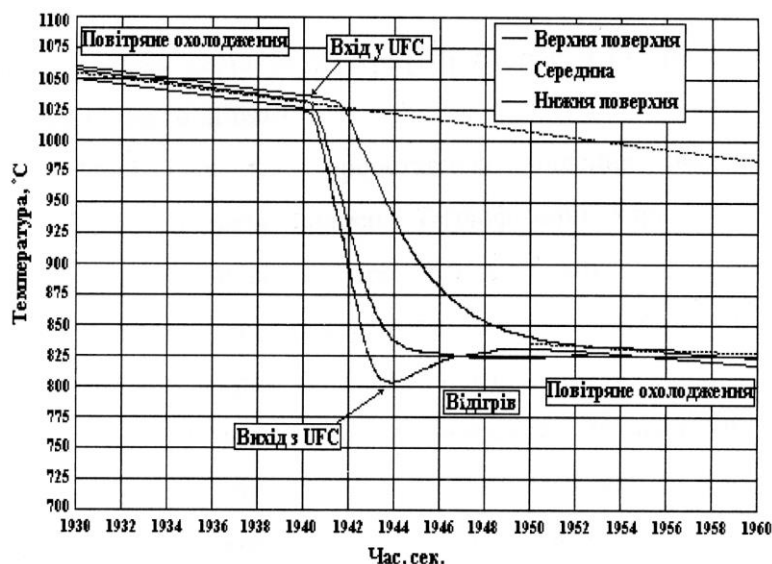


Рис. 3 – Зміна температури в прокаті товщиною 20 мм на лабораторній установці за допомогою пристрою для охолодження з розподілом води верх/низ – 40/60 (копія рис. 5 з роботи [1])

Враховуючи високу вартість виконання досліджень методом фізичного моделювання, становить значний інтерес розшифровка приведених у роботі [1] результатів. Для цього вирішена друга тестова задача по обробці результатів роботи [1] з метою використання їх для проектування елементів нової технології прокатки листа.

Подібна задача ускладнюється тим, що необхідно вирішити інверсну і зворотну задачі теплопровідності з метою уточнення теплофізичних характеристик матеріалу, з якого було зроблено зразок у дослідженнях [1] і визначення глибини установки термопар при лабораторних дослідженнях. Тільки після виконання подібної роботи можна оцінити коефіцієнти тепловіддачі від поверхонь листа до води, що забезпечує регламентоване технологією охолодження полоси і раціональне використання води.

При рішенні інверсної задачі, у якості контрольних даних використовували результати охолодження листа на повітрі [1]. На рис. 2 і рис. 3 ці залежності представлені штриховими лініями.

На рис. 4 і рис. 5 представлено рішення зворотної задачі при реконструкції теплового поля полоси. Теплофізичні характеристики матеріалу встановили ітераційним шляхом при реконструкції теплового поля зразка використовуючи дані про зміну температури поверхні листа при його охолодженні на повітрі (штрихові лінії на рис. 2 і рис. 3).

Ітераційним шляхом знаходили такі залежності температури шарів від часу охолодження, які співпадали з даними роботи [1] про залежності температур середини, «верхньої» і «нижньої» поверхонь з точністю 10°C . Цей підхід дозволив встановити фактичну глибину установки термопар у дослідженнях [1]. При математичному моделюванні умов проведення лабораторних досліджень найбільш повний збіг результатів теоретичного рішення з даними [1] має місце за умови, що так звана "нижня поверхня" розташована на глибині 4,8 мм, а "верхня поверхня" – на відстані 2,4 мм від поверхні зразка. У такому випадку, теоретичний графік зміни температур по перетину зразка товщиною 20 мм (рис. 4) практично збігається з експериментальним графіком (рис. 2) на всіх ділянках охолодження.

Результати реконструкції теплового поля зразка приведені на рис. 4.

Незважаючи на подачу однакової кількості води на верхню і нижню поверхню (50/50) у дослідженнях [1] коефіцієнт тепловіддачі на верхній поверхні в 2,5 рази вище, ніж на нижній. Ці дані підтверджують приведену в [1] думку про неефективну роботу нижніх пристроїв для охолодження на лабораторній установці в початковий період виконання досліджень.

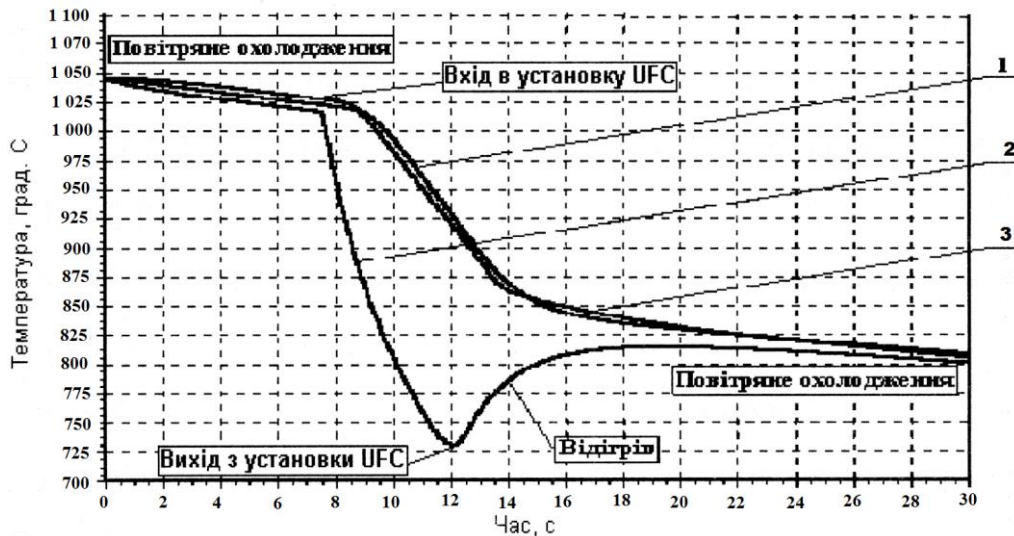


Рис. 4 – Теплове поле зразка товщиною 20 мм з охолодженням 50/50: 1 – середина листа; 2 – 2,4 мм від верхньої поверхні; 3 – 4,8 мм від нижньої поверхні

Рішення другої тестової задачі – реконструкція теплового поля зразка, дала змогу не тільки встановити суттєву різницю коефіцієнтів тепловіддачі на нижній і верхній поверхнях, але і довести, що охолодження листа залежить не тільки від кількості води. Як було показано вище, однакова кількість води, яка подавалась на охолодження поверхонь полоси, у роботі [1] використовувалась неоднаково ефективно. Тому при проектуванні систем охолодження полоси слід мати на увазі, що суттєвим є, крім того, ще і спосіб подачі води.

У поняття спосіб подачі води входять: – переріз потоку води, який формується геометрією форсунки; – кут нахилу вісі форсунки до поверхні полоси; – розташування форсунок на колекторі відносно вісі прокатки; – зона ефективної дії потоку води з однієї форсунки; – перекриття зон ефективної дії потоків води; – існування зон, у яких перетинаються потоки води з різних форсунок.

На рис. 5 приведена реконструкція теплового поля полоси товщиною 20 мм за даними з рис. 3.

Результати математичного моделювання (рис. 4 і рис. 5) умов проведення роботи [1] свідчать, що авторам вдалося експериментальним шляхом домогтися ефективної роботи нижніх пристроїв для охолодження полоси.

Товстими лініями показано залежності температур від часу на глибинах 2,4 мм від верхньої поверхні, 4,8 мм від нижньої поверхні і в середині зразка, які збігаються з експериментальними температурами в роботі [1] (верхня поверхня, нижня поверхня, середина) з точністю 10°C. Тонкими лініями показано теоретичні значення фактичних температур на верхній і нижній поверхнях в процесі експерименту [1].

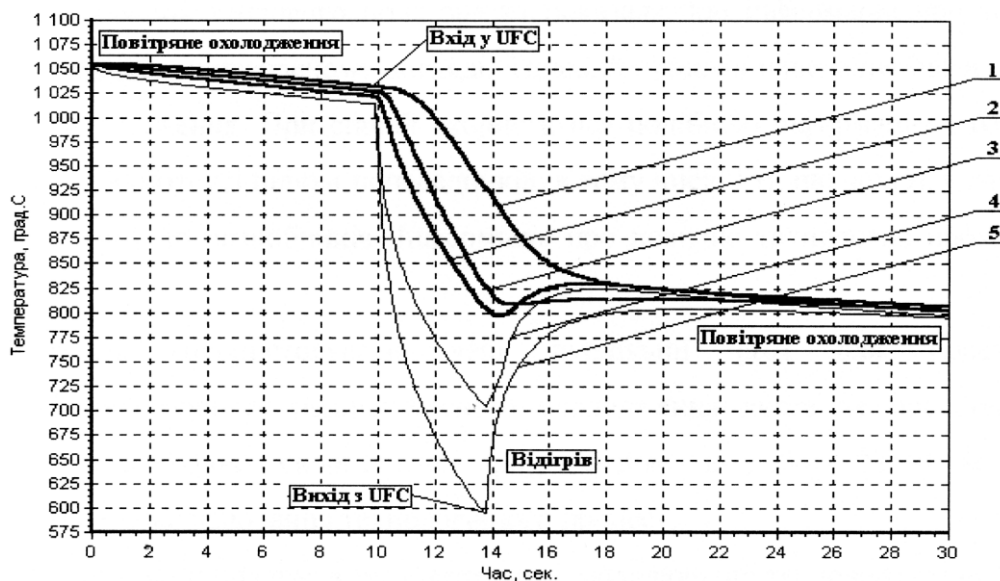


Рис. 5 – Теплове поле зразка товщиною 20 мм з охолодженням 40/60 після реконструкції: 1 – середина листа; 2 – 2,4 мм від верхньої поверхні; 3 – 4,8 мм від нижньої поверхні; 4 – верхня поверхня; 5 – нижня поверхня

Знання фактичних температур на верхній і нижній поверхнях дозволило коректно вирішити зворотну задачу теплопровідності – визначити коефіцієнт тепловіддачі від поверхні полоси до води.

Коефіцієнт тепловіддачі від нижньої поверхні полоси до води збільшився в 3,5 рази в порівнянні з результатами, приведеними на рис. 4. Відношення коефіцієнтів тепловіддачі від верхньої і нижньої поверхонь тепер складає 1/1,6, при співвідношенні кількості води, що подається 40/60 або 1/1,5. Майже повний збіг відносин коефіцієнтів тепловіддачі верх/низ з відношенням кількості води, що подається (1/1,6; 1/1,5) свідчить про розробку авторами [1] працездатної конструкції пристроїв для охолодження полоси.

Реконструкція теплового поля зразка показала, що інформація роботи [1] про установку UFC приведена в спотвореному вигляді. При спробі скористатися подібною інформацією, бажаним прийдеється пройти усі шляхи попередників, в тому числі і ті, що ведуть у глухий кут, або звернутися до розробників. Інформація про новітню технологію прокатки має ціну.

Оскільки використовувати дані публікації [1] для проектування технологічного процесу надшвидкісного охолодження листа не представляється можливим, необхідно скористатися розробленою в роботі [2] методикою математичного моделювання технологічного процесу.

Суть методики полягає в математичному моделюванні теплового стану листа на ділянці технологічного процесу, що проектується (див. тестову задачу номер один). З теоретичного розрахунку визначається необхідна інтенсивність

охлаждения (коэффициент тепловіддачі) для верхньої і нижньої поверхонь. Різні значення коефіцієнтів тепловіддачі для поверхонь можуть бути обумовлені вимогою технології, з метою уникнення «ефекту лижі» – загину листа вниз.

Необхідні значення коефіцієнтів тепловіддачі від полоси до води повинні бути отримані з експериментальних досліджень при використанні різних типів форсунок.

Висновки. 1. Шляхом рішення тестових задач, доказано можливість математичного моделювання елементів нових технологічних процесів прокатки. Встановлено, що інформація про надшвидкісне охолодження, наведена у іноземній технічній літературі у вигляді, що виключає можливість використання.

2. Враховуючи високу складність і високу вартість натурних експериментів результати теоретичних досліджень співставлено з даними експериментальних досліджень процесу надшвидкісного охолодження полоси., отриманими англійськими та французькими дослідниками теплового стану валків.

3. Запропонований метод математичного моделювання теплового стану полоси є перспективним, оскільки у цьому випадку відпадає необхідність проведення безлічі експериментальних досліджень високої вартості. Він дозволив уточнити характер течії металу в зоні деформації. Для доповнення математичної моделі необхідно лише, експериментальним шляхом, отримати значення коефіцієнтів тепловіддачі від полоси до води.

Список літератури: 1. De Paepe, Simon P., Moerkerke I., Hermann J.C. Control of the temperature of the bar on entry to the finisher // ECSC STEEL RTD PROGRAMME. – 2000. – P. 1–9. 2. Тришевский О. И., Салтавец Н. В. Разработка математической модели теплового состояния полосы при прокатке // Сталь. – 2009. – № 2. – С. 42–49. 3. Тришевський О. І., Салтавець М. В. Система реєстрації температури в процесах обробки металів тиском. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Краматорськ: ДДМА. – 2005. – С.107–110. 4. Тришевський О. І., Салтавець М. В. Оцінка зусиль на валки від металу, що прокатується. // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. № 24. – 272 с. 5. Тришевський О. І., Салтавець Н. В. Проектирование элементов новой технологии прокатки листа. // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів.– Дніпропетровськ: НМетАУ. – 2005. – С. 248–251.

Bibliography (transliterated): 1. De Paepe, Simon P., Moerkerke I., Hermann J.C. Control of the temperature of the bar on entry to the finisher ECSC STEEL RTD PROGRAMME. – 2000. – P. 1–9. 2. Trishevskiy O. I., Saltavec N. V. Razrabotka matematicheskoy modeli teplovogo sostoyaniya polosih pri prokatke Stal'. – 2009. – No 2. – P. 42–49. 3. Trishevskiy O. I., Saltavec M. V. Sistema reestratsii temperaturi v procesakh obrobki metaliv tiskom Moscow Udoskonalennya procesiv i obladnannya obrobki tiskom v metalurgii i mashinobuduvanni: Kramators'k: DDMA.–2005. P. 107–110. 4. Trishevskiy O. I., Saltavec MOSCOW V. Ocinka zusily na valki vid metalu, tho prokatuet'sya. Visnik nacional'nogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivskiy politekhnichnij institut» – Kharkiv: NTU «KhPI».–2005. No 24. –272 P. 5. Trishevskiy O. I., Saltavec N. V. Proektirovanie ehlementov novoy tekhnologi prokatki lista. Suchasni problemi metalurgii. Naukovi visti. Tom 8. Plastichna deformaciya metaliv. – Dnipropetrovsk: NMetAU. – 2005. – P. 248–251.

Поступила (received) 05.10.2014