

В.Л. Мазур¹, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., гол. наук. співр., e-mail: prof.vlm@ukr.net

В.І. Тимошенко², чл.-кор. НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф., заст. директора з наукової роботи, e-mail: vitymoshenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8588-2468>

І.Ю. Приходько³, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5651-8106>

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

²Інститут технічної механіки НАН України і Державного космічного агентства України (Дніпро, Україна)

³Інститут чорної металургії імені З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Реалізація методів розрахунку в спеціалізованій комп'ютерній системі напружено-деформованого і температурного стану рулонів сталевих штаб

Розроблено теорію формування та трансформації напружено-деформованого та температурного стану рулонів гарячекатаних та холоднокатаних сталевих штаб при їх змотуванні-розмотуванні у процесах прокатки, термічної обробки, дресування, транспортування, складування, виконання інших виробничих операцій на металургійних комбінатах. Запропоновано математичні моделі, алгоритми та комп'ютерну систему, що їх реалізує. Наведено опис можливостей використання цієї системи при вирішенні різних завдань. В комп'ютерній системі розглянуто підхід до оцінки впливу параметрів процесу холодної прокатки та змотування штаб у рулони, температурно-швидкісних режимів їх нагрівання і охолодження при відпалі у ковпакових печах. Вперше розкрито методологію виявлення закономірностей впливу міжвиткових зазорів у рулонах на їх напружено-деформований стан. Показано процедуру виявлення ефектів швидкості холодної прокатки, температури, натягу штаб, що прокатуються і змотуються в рулони, шорсткості їх поверхні на напружено-деформований стан рулонів. У деталях показано реалізацію в комп'ютерній системі нових ідеологій та підходів до вирішення ключової в технології листопрокатного виробництва задачі визначення напружено-деформованого стану (НДС) рулонів. Моделі та алгоритми розрахунку НДС, що покладені в основу комп'ютерної системи, розроблені на основі класичних рішень у галузі матеріалознавства, теорій пружності, обробки металів тиском, теплотехніки, газової динаміки, чисельних методів та інших сфер знань. У комп'ютерній системі розкрито механізми формування температурного та напружено-деформованого стану рулонів сталевих штаб у процесах прокатки, нагріву, ізотермічної витримки та охолодження під час відпалу в ковпакових печах; враховано вплив температурно-швидкісних режимів прокатки та відпалу на виникнення критичних міжвиткових тисків у рулонах, що призводять до дефектів поверхні штаб «лінії перегину» (злами) та дефектів форми рулонів. Розкрито можливість впливу на НДС рулонів при прокатуванні регулюванням натягу штаби, а при відпалі регулюванням тривалості ізотермічної витримки та швидкості подальшого охолодження рулонів. Надано посилання на літературні джерела, в яких детально викладено результати досліджень науково-технічних задач, що реалізуються у комп'ютерній системі. В комп'ютерній системі використані способи змотування холоднокатаних штаб у рулони, що виключають втрату їх стійкості та утворення дефектів «перегини», просідання, «пташка» при виробництві тонколистової сталі в промислових умовах. Дано рекомендації щодо вибору раціональної технології виробництва рулонним способом гарячекатаних та холоднокатаних штаб, жерсті. Розроблені рішення реалізовано в комп'ютерній системі «CoilTemp3D» і використовуються на виробництві.

Ключові слова: металургія, сталь, виробництво штаб, якість, рулони, напружений стан, розрахунки, алгоритми, комп'ютерні системи, запобігання дефектам.

Вступ. В даний час основним способом виробництва тонколистової сталі на металургійних заводах є рулонний [1]. Головне завдання при виробництві цієї металопродукції є забезпечення її

високої якості, попередження дефектів гарячекатаних і холоднокатаних штаб, що змотуються в рулони. Тенденція розвитку листопрокатного виробництва полягає у збільшенні маси рулонів. При збільшенні

маси рулонів підвищується важливість намоточно-розмотувальних операцій штаб, що застосовуються на технологічних перетинах виробництва листової сталі та істотно впливають на якість готової продукції. При цьому неодноразово змінюється напружено-деформований та температурний стан рулонів штабової сталі. Відповідно зростає актуальність теми теоретичного та експериментального дослідження напруженого стану рулонів та реалізації ефективних технічних рішень у виробничій практиці. Теорія та технологія рулонного способу виробництва тонколистової сталі, формування напружено-деформованого стану рулонів холоднокатаних штаб детально розглянуті у монографії [2]. Враховуючи високу складність теоретичних та практичних задач у цій темі, особливої уваги вимагають питання використання методів чисельного моделювання при їх вирішенні.

Запропонована в роботах [3–5] постановка задачі визначення параметрів напруженого та температурного стану рулонів дозволила враховувати характеристики контактуючих поверхонь витків штаби, їх неплоскоцильність та шорсткість. Особливості враховуються використанням введеного в роботі [6] поняття узагальненого неідеального контакту, що дозволяє, з одного боку, враховувати в умовах спільності деформацій зближення сусідніх поверхонь, що контактують, як функцію від міжвиткових тисків [5], а з іншого боку – розрив у температурі на суміжних поверхнях витків. Специфіка завдання визначається тим, що при охолодженні та нагріванні рулону в ньому виникає змінне температурне поле, яке викликає додаткові термічні напруги, які можуть впливати на напружений стан рулону. У свою чергу, за наявності термічних опорів на суміжних поверхнях витків, величини яких значною мірою визначаються міжвитковими тисками, зміна температури в рулоні залежить від його напруженого стану. Взаємодія температурного та пружно-деформованого стану рулонів суттєва. Все це ускладнює розв'язання задачі.

Ефективним засобом подолання зазначених складнощів та зниження витрат на відпрацювання та оптимізацію технологічних пристроїв та вибір раціональних режимів їх роботи є методи чисельного моделювання. Використання чисельних методів для моделювання процесів формування напружено-деформованого стану рулонів сталевих штаб вимагає розв'язання великої кількості окремих, досить складних задач, кожна з яких, будучи частиною комплексного завдання, становить також самостійний інтерес [2]. На цьому етапі мета досліджень полягає у формулюванні фізичної та математичної моделей, які дозволяють описати технологічний процес намотування, нагрівання, розмотування рулонів з необхідною для практики повнотою та точністю. Метою також є розробка ефективних алгоритмів та створення на їх основі програмного забезпечення, яке дозволяє виконувати розрахунки на наявних комп'ютерних системах за практично прийнятних витратах машинного часу.

Складовою частиною розробленого програмно-методичного забезпечення розрахунків напружено-деформованого і температурного стану рулонів є

комплекс прикладних програм, який включає інформацію про його призначення, структуру, про можливості формування та запам'ятовування вихідних даних, завдання для проведення поточних розрахунків та обробки і зберігання їх результатів. Комплекс прикладних програм, що викладається нижче, розрахований переважно на фахівців, що працюють в галузі листопрокатного виробництва, знають особливості технології холодної прокатки, відпалу, дресування, обробки тонколистової сталі в рулонах.

Комп'ютерна система «CoilTemper3D» для моделювання напружено-деформованого та температурного стану рулонів холоднокатаних штаб. Нижче наведено комплекс програм «CoilTemper3D», використання якого дозволяє отримувати чисельні рішення розглянутих вище задач [2]. Комплекс програм «CoilTemper3D» (рис. 1) є конкретним прикладом програмного забезпечення, що відповідає викладеним вище вимогам.

Комплекс програм імітаційного моделювання «CoilTemper3D» призначений для розрахунку нестационарного теплового та напружено-деформованого стану рулонів холоднокатаних штаб у процесі намотування на барабан моталки, зняття з барабана моталки, нагрівання та охолодження рулонів при заданих коефіцієнтах тепловіддачі та циклограмах температури високотемпературного захисного газу у ковпаковій печі. Структурно комплекс програм «CoilTemper3D» складається з двох відносно незалежних частин. Перша частина комплексу включає прикладні програми для чисельного визначення напружено-деформованого та температурного стану рулонів у процесі намотування рулонів, їх зняття з барабана моталки, нагріву в ковпаковій печі та охолодження. Відповідні алгоритми та комп'ютерні програми включені в комплекс «CoilTemper3D» у вигляді виконуваних EXE-файлів. Програми першої частини написані алгоритмічною мовою Fortran. Рішення названих завдань та аналіз отриманих результатів представлено у наших публікаціях [7–9] та монографії [2]. Друга частина (сервісна) представляє набір візуальних компонентів (віконних форм, текстових вікон, командних кнопок, клавіш та ін.) і спеціально розробленого програмного забезпечення. Віконна фор-

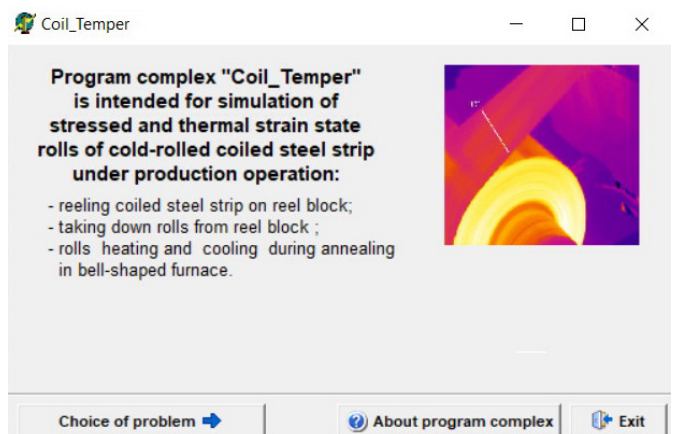


Рис. 1. Титульне вікно комплексу програм «CoilTemper3D»

ма є оформлене відповідним чином вікно Windows. Ці вікна разом з розміщеними на них візуальними компонентами є інструментом для вибору завдань, формування вихідних даних, порівняльного аналізу результатів, їх збереження та використання у програмах Windows (Microsoft Word, Excel та ін.).

Віконні форми з'являються на екрані послідовно при необхідності в процесі роботи користувача з програмою. На екрані відображається та є активною тільки та форма, яка дозволяє виконати необхідні для поточного етапу роботи з програмою дії. Перехід до наступної форми (після виконання всіх необхідних дій у поточній формі) або повернення до попередньої форми (можливо для внесення виправлень) відбувається після натискання на відповідні кнопки. Окремі віконні форми представлені нижче за текстом як ілюстрація інформації, що викладається. Функціонування віконних форм та інших візуальних компонентів забезпечується програмами, написаними алгоритмічною мовою Object Pascal. Крім того, складовою комплексу є програми, що реалізують алгоритми підготовки файлів вихідних даних для прикладної програми, виходячи з введеної користувачем у текстові вікна інформації, а також забезпечують запуск прикладної програми, візуальне подання отриманих результатів у вигляді графічних залежностей, таблиць та ін. Ці програми максимально використовують об'єкти інтегрованого середовища Delphi.

Комплекс забезпечений розгалуженою довідковою системою, що забезпечує користувача: інформацією про його призначення та структуру; коротким описом фізичної та математичної постановок розв'язуваних завдань; описом можливостей формування та запам'ятовування вихідних даних, проведення поточних розрахунків, обробки та зберігання результатів розрахунків. Сервісна частина комплексу забезпечує роботу користувача в інтерактивному діалоговому режимі з використанням термінів та визначень із предметної галузі призначення комплексу. Як ілюстрації нижче за текстом наведено варіанти віконних форм, що забезпечують завдання вихідних даних та окремих результатів розрахунків.

До складу комплексу програм «CoilTemper3D» включено (рис. 2):

– програму розрахунку напруженого стану рулонів холоднокатаних штаб при їх намотуванні на барабан моталки [5, 10 та ін.];

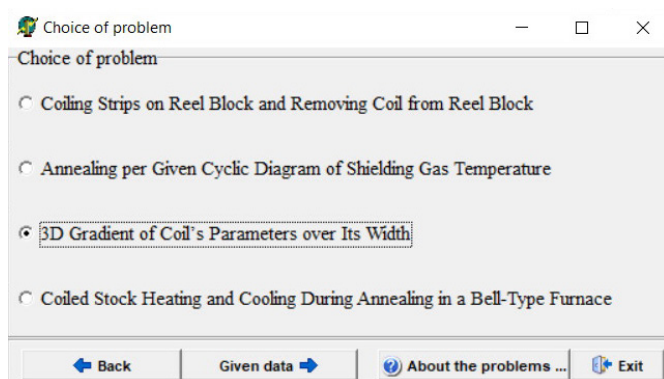


Рис. 2. Віконна форма завдання розв'язуваного завдання

– програму розрахунку напруженого стану рулонів холоднокатаних штаб після зняття рулону з барабана моталки та охолодження [3, 4 та ін.];

– програму розрахунку температурного поля та міжвиткових тисків та натягу витків рулону при його нагріванні та охолодженні в ковпаковій печі [7, 9].

Порядок роботи. Комплекс програм працює в інтерактивному діалоговому режимі з використанням технічних термінів та визначень із предметної галузі призначення комплексу. Практична робота з комплексом не вимагає від користувача будь-якої спеціальної підготовки у галузі програмування та вивчення спеціальних інструкцій щодо роботи з комплексом.

Робота користувача з комплексом зводиться до наступної послідовності дій:

- вибір задачі;
- завдання вихідних даних задачі відповідно до представленого прототипом їх значень за замовчуванням;
- запуск завдання на рахунок;
- вибір видів подання результатів з переліку запропонованих комплексом видів обробки рішення задачі;
- подання результатів вирішення обраної задачі на екрані монітора у вигляді числової чи графічної інформації залежно від вибраних видів обробки рішення;
- порівняння результатів з раніше отриманими результатами обраної задачі при інших вихідних даних задачі.

Визначальні параметри. Визначальними параметрами завдання розрахунку напружено-деформованого та теплового стану рулонів є (рис. 3):

– геометричні параметри, що задають внутрішній та зовнішній радіус рулону, товщину, ширину штаби та кількість витків (при цьому візуалізуються теоретична маса та довжина штаби в рулоні); при заданні зовнішнього радіуса рулону автоматично обчислюється кількість витків та навпаки;

– параметри змотування штаби в рулон: модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу штаби, радіальна жорсткість барабана моталки, закон зміни натягу штаби при змотуванні та параметри прокатки (графік швидкості та температури штаби в ході змотування) [7–8, 10 та ін.];

– теплофізичні параметри та температура (задаються температура та теплофізичні параметри шта-

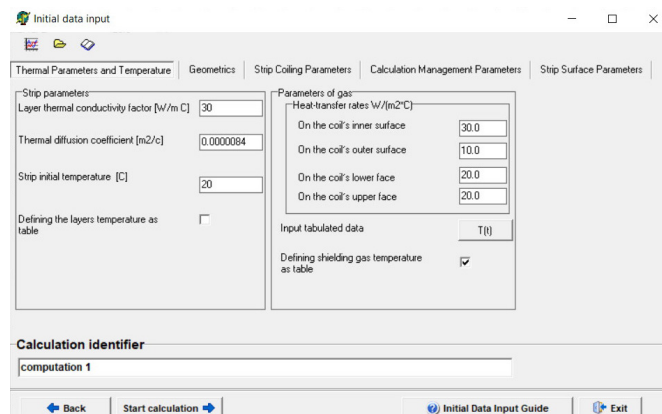


Рис. 3. Віконна форма завдання вихідних даних

би: коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт температуропровідності, початкова температура рулону перед технологічною операцією; задаються також коефіцієнти тепловіддачі газу в ковпаковій печі, циклограма температури захисного газу, коефіцієнти тепловіддачі на зовнішній, внутрішній поверхнях та з торців рулону) [9];

– параметри поверхні штаби (залежність, що характеризує зближення поверхонь витків при зминанні мікронерівностей поверхонь штаби від міжвиткового тиску, залежність величини термічних опорів від тиску, власне величину шорсткості поверхні штаби, а також температуру початку схоплювання (зварювання) контактуючих поверхонь витків штаби в рулоні) [11–14];

– параметри управління рахунком (перша група параметрів: час кінця технологічного процесу, крок маршового рахунку за часом, кількість точок за радіусом рулону та кількість перерізів за шириною штаби в рулоні для розрахунку температури; друга група параметрів: умови виведення результатів – крок за часом для друку радіальних розподілів параметрів, кількість циклів між друком залежностей параметрів від часу, крок по виткам для друку розподілів параметрів в радіальному напрямку).

Вихідні дані задаються у закладках форми «Введення вихідних даних». За промовчанням використовуються дані, внесені у відповідні текстові вікна. Існує можливість при новому сеансі роботи з програмою (при запуску програми) скористатися вихідними даними, за яких було проведено останній розрахунок у попередньому сеансі роботи з програмою. Для цього необхідно у верхньому меню на формі клацнути лівою кнопкою «мишки» на жовтому значку «книга, що розкривається».

В результаті розрахунку визначаються [2]:

– міжвиткові тиски та дотичні напруги в рулоні в процесі змотування штаби на барабан моталки;

– міжвитковий тиск і дотичні напруги в рулоні після зняття рулону з барабана моталки;

– розподіл температури витків за радіусом рулону та шириною штаби, величини термічної напруги в рулоні з урахуванням неідеальності теплового та механічного контактів суміжних поверхонь витків, обумовлених шорсткістю поверхні штаби;

– залежно від температури штаби в характерних точках рулону, а також максимальних міжвиткових напруг і прогнозних зусиль відриву поверхонь зчеплених (злипаних) контактуючих поверхонь витків штаби в рулоні під час відпалу;

– прогнозні оцінки умов схоплювання, злипання та зварювання витків рулону в ході рекристалізаційного відпалу залежно від температури та тривалості відпалу, а також міжвиткового тиску та шорсткості поверхні штаби.

Параметри змотування штаби в рулон. Закон зміни натягу штаби при змотці задається у вигляді за-табульованої шматково-лінійної функції. Задається постійна величина натягу штаби при змотуванні. До цієї величини віднесені як до масштабу всі напруги: натяг штаби при змотці при змінному законі натягу і міжвиткові тиски, що розраховуються, і дотичні на-

пруги. При змінному натягу задається таблиця значень натягу, поділених на відповідні номери витків. Для обчислення натягу штаби у проміжних витках використовується лінійна інтерполяція. Щоб задати табличні значення, слід зазначити відповідний прапорець на формі й ввести табличні дані.

Змотування штаби в умовах прокатки зі змінною швидкістю відбувається в неізотермічних умовах. Рулон має різну температуру витків. При подальшому вирівнюванні температури витків відбувається зміна його напруженого стану через різне теплове розширення – стискування витків, що спочатку мають підвищену температуру і розширення витків або спочатку мають нижчу температуру. У зв'язку з цим у програмі реалізовано завдання параметрів прокатки: функції зміни температури штаби від швидкості прокатки, циклограма прискорень (уповільнень) процесу прокатки або закон зміни температури витків штаби під час змотування.

Параметри поверхні штаби. На вкладці «Параметри поверхні штаби» задаються множники, що коригують, при функціях зближення витків шорсткої штаби δ і зміни термічних опорів RT від міжвиткового тиску q , МПа. Якщо коригувальні множники дорівнюють нулю, то розрахунок проводиться у припущенні ідеального прилягання витків. Тобто зближення витків обнуляються, і термічні опори не враховуються.

Надано можливість задавати табличні значення δ та RT як функції міжвиткових тисків q . Щоб скористатися цією можливістю, слід поставити відповідний прапорець на формі та ввести необхідні табличні дані. При завданні δ є можливість задавати залежність від стискаючих зусиль або зближення поверхонь, або зазору між поверхнями.

На цій формі також задається параметр шорсткості поверхні Ra , який використовується при визначенні питомих зусиль відриву і є орієнтиром при виборі залежності зближення поверхонь витків та термічних опорів від стискаючих зусиль. Задається також параметр – температура початку схоплювання (за замовчуванням рівна 600 °С) витків, яка також використовується для визначення питомих зусиль відриву (роз'єднання злипаних поверхонь контактуючих витків в рулоні).

Теплофізичні параметри та температура в печі при відпалі. Задаються теплофізичні параметри, коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях рулону, що омиваються захисним газом, а також циклограма температури захисного газу.

Необхідно також задати температуру витків рулону перед початком технологічної операції, яку аналізують. За постійної температури необхідно ввести відповідне значення початкової температури T °С. При змінній початковій температурі штаби визначається таблиця значень температури T °С, що відповідають певним номерам витків. Для обчислення температури штаби у проміжних витках використовується лінійна інтерполяція. Щоб задати табличні значення, слід поставити відповідний прапорець на формі і ввести необхідні табличні дані. Відповідна графічна залежність відображається на малюнку.

Циклограма температури захисного газу в печі. Встановлюється або постійна температура навколишнього середовища, або змінна температура захисного газу в ковпаковій печі T °С. При змінній температурі захисного газу визначається таблиця значень температури у відповідні моменти часу – циклограма температури захисного газу. Для розрахунку температури захисного газу в проміжні моменти часу використовується лінійна інтерполяція. Щоб задати табличні значення, слід зазначити відповідний прапорець на формі і ввести табличні дані.

Параметри керування рахунком. Параметри керування рахунком поділені на дві групи. Перша група параметрів визначає параметри сітки і час кінця рахунку. Друга група визначає умови виведення результатів.

Перша група: час кінця процесу в годиннику, крок маршового рахунку за часом у секундах, кількість точок за радіусом рулону та кількість перерізів за шириною рулону для розрахунку температури.

Друга група: крок за часом у секундах для друку радіальних розподілів параметрів, кількість циклів між печаткою залежностей параметрів від часу, крок по витках для друку радіальних розподілів параметрів.

Проведення серії розрахунків. Програма дозволяє проводити серії розрахунків щодо параметричного аналізу.

Для проведення наступного розрахунку необхідно із форми «Аналіз результатів» повернутися у форму «Введення вихідних даних» та задати нові дані. У відповідному текстовому вікні форми «Введення вихідних даних» потрібно задати бажану назву варіанта для його ідентифікації. За замовчуванням задається номер розрахунку.

Аналіз результатів розрахунків. У ході перегляду графіків надано можливість порівнювати результати розрахунків і вибирати потрібні варіанти.

При необхідності, щоб переглянути файл вихідних даних для одного з варіантів слід зробити подвійне натискання «мишки» на імені варіанта.

Користувач має можливість подати результати розрахунків напруги в ізотермічному рулоні у вигляді (рис. 4):

- графіків міжвиткових тисків у рулоні на барабані та зміни тиску на барабан у процесі змотування залежно від кількості намотаних витків;

- графіків міжвиткових тисків в рулоні, знятому з барабана. Змінність температури в цьому випадку є наслідком прокатки та змотування штаби при змінній швидкості.

Для неізотермічного рулону є можливість проаналізувати залежності зміни температури витків, міжвиткових тисків і дотичних напруг, термічних напруг (рис. 5) у витках в процесі нагрівання або охолодження рулону в ковпаковій печі.

Результати подаються у вигляді:

- графіків залежностей параметрів у серединному перерізі рулону від радіуса рулону чи номера витка у різні моменти часу. Для наочнішого представлення результатів є можливість змінювати крок зміни часу під час перегляду;

- графіків температури внутрішнього, серединного та верхнього витків та максимального значення міжвиткових тисків у рулоні як функцій часу;

- графіків прогнозованих питомих зусиль відриву поверхонь штаби при схоплюванні, злипанні та зварюванні витків рулону в ході рекристалізаційного відпалу залежно від температури та тривалості відпалу, а також міжвиткового тиску q та шорсткості поверхні Ra штаби;

- 3D-графіків зміни температури за шириною та товщиною рулону під час відпалу.

Більш широкий, детальний виклад особливостей комп'ютерної системи «CoilTemper3D» та нюансів визначення напружено-деформованого та темпера-

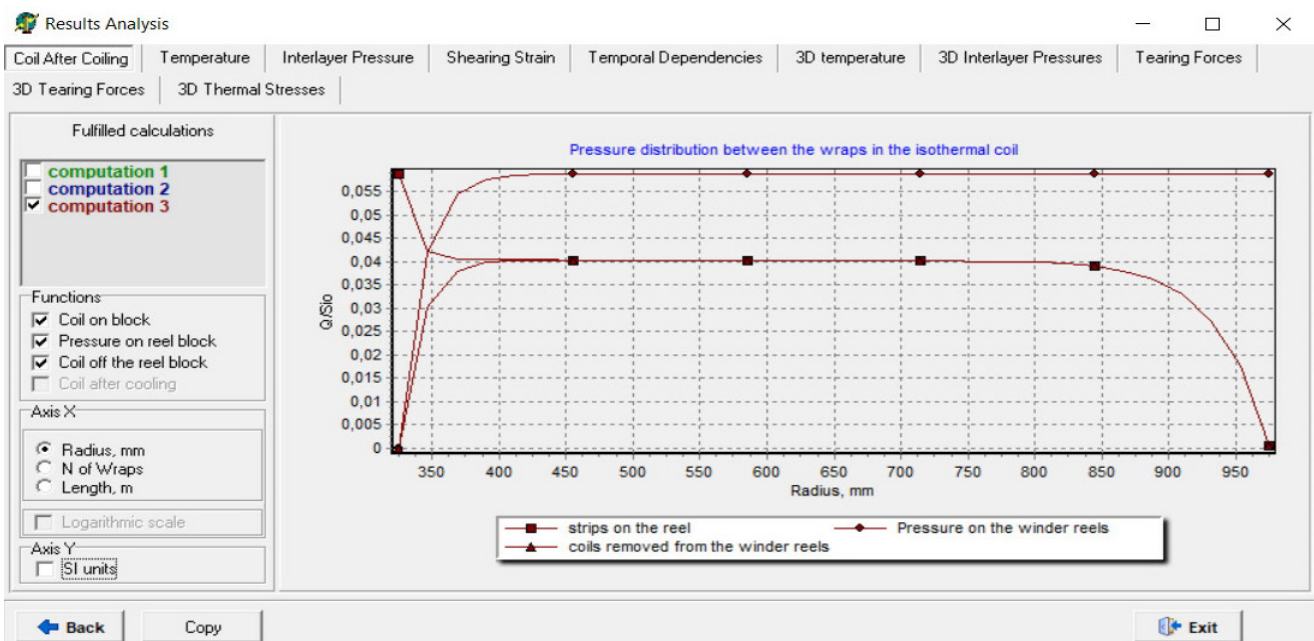


Рис. 4. Розподіл міжвиткових тисків у рулоні

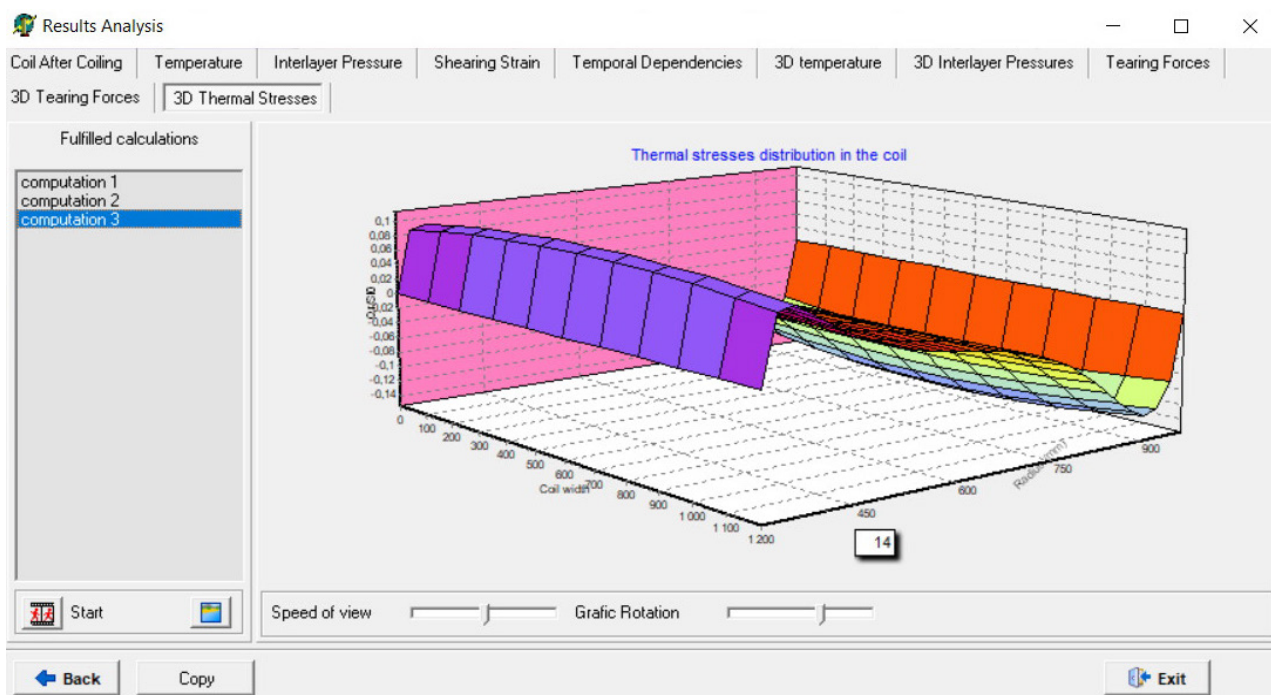


Рис. 5. Термічні напруги в рулоні

турного стану рулонів холоднокатаних сталевих штаб представлено в нашій монографії [2].

Таким чином, вперше в однопрогравному комплексі реалізовані завдання об'ємного температурного та напруженого стану рулонів при змотуванні штаб на стані холодної прокатки та подальшому відпалу з прогнозуванням умов злипання, відносного прослизання (відносного зміщення) суміжних витків, а також втрати стійкості рулонів на різних перетинах виробничого процесу.

Комплекс програм «CoilTemper3D» адаптований для застосування в системах управління технологічним процесом виробництва холоднокатаної сталі в промислових умовах. Система може використовуватися у вигляді автоматичного модуля «стратегія змотування рулонів» на станах холодної прокатки штаб, а також у вигляді засобів перевірки та уточнення режимів відпалу рулонів холоднокатаних штаб у промислових умовах залежно від режимів змотування, а також параметрів площинності та шорсткості поверхні змотаних у рулони холоднокатаних штаб.

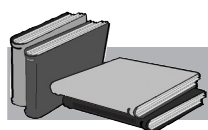
Надзвичайно важливими питаннями, які вирішуються за допомогою розробленої комп'ютерної систе-

ми «CoilTemper3D», є попередження дефектів тонколистової сталі та забезпечення високої якості готової продукції. Зокрема, комп'ютерна система реалізує ідеологію попередження перегинів (зламів) тонколистової сталі [15, 16], вирішує цю актуальну проблему, що стоїть практично перед усіма металургійними комбінатами [17]. Виконання алгоритму та рекомендацій щодо вибору оптимальних режимів прокатки, відпалу, операцій змотування-розмотування рулонів тонколистової сталі, передбачених у комп'ютерній системі, виключає втрату форми та інші дефекти рулонів [18].

Особливо підкреслимо, що науково-технічні рішення, покладені в основу, фундамент системи «CoilTemper3D», впроваджено у виробничу практику низки металургійних комбінатів, що спеціалізуються на виготовленні листопрокатної продукції [2].

Висновки

Результати теоретичних та експериментальних досліджень у галузі виробництва тонколистової сталі в рулонах представлені у вигляді спеціалізованої комп'ютерної системи.

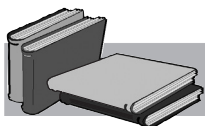


ЛІТЕРАТУРА

1. Mazur V.L., Nogovitsyn O.V. Theory and Technology of Sheet Rolling. Numerical Analysis and Applications. London – New York. CRC Press. Taylor and Francis Group, 2019. 479 p.
2. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Приходько И.Ю. Теория и технология прокатки (напряженно-деформированное состояние рулонов стальных полос). Киев: Издательство «Феникс», 2021. 416 с.
3. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Напряженно-деформированное состояние рулонов холоднокатаных полос. Сообщение I. Известия вузов. Черная металлургия. 1979. № 4. С. 55–59.

4. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Напряженно-деформированное состояние рулонов холоднокатаных полос. Сообщение II. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1979. № 6. С. 52–55.
5. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Расчет напряженного состояния рулонированных цилиндров. *Механика композитных материалов*. Рига: Зинатне, 1982. № 5. С. 880–886.
6. Тимошенко М.В. Численное моделирование теплообмена в многослойных конструкциях с обобщенным неидеальным контактом. *Инженерно-физический журнал (ИФЖ)*. 1996. Т. 69. № 5. С. 773–778.
7. Mazur V.L., Prihod'ko I.Yu. Influence of Pulling Modes and Temperature of Coiling Cold-Rolled Strips. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. Iss. 9. P. 618–628.
8. Mazur V.L., Timoshenko V.I., Prihod'ko I.Yu. Efficient Cold Rolling and Coiling Modes. *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49. Iss. 8. P. 548–558.
9. Mazur V.L., Timoshenko V.I., Prihod'ko I.Yu. Influence of Annealing Modes in Bell Furnaces on the Stress-Strain State of Rolls of Cold Rolled Steel. *Steel in Translation*. 2021. Iss. 9. P. 648–657.
10. Mazur V.L., Timoshenko V.I., Prihod'ko I.Yu. Regulating the Coil Stress by Adjusting the Rigidity of the Winding Drum. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No. 8. P. 528–535. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218080090>
11. Mazur V.L. Ensuring Specified Surface Roughness in the Production of Thin Cold-Rolled Steel Sheet. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No. 1. P. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091218010102>
12. Мазур В.Л., Тимошенко В.И. Теория и технология прокатки (гидродинамические эффекты смазки и микрорельеф поверхности). Киев: ИД «АДЕФ Украина», 2018. 560 с.
13. Приходько И.Ю., Тимошенко В.И., Чернов П.П. и др. О механизме влияния шероховатой поверхности холоднокатаных полос на условия слипания витков рулонов при отжиге и образование дефектов поверхности. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 8–9. С. 92–101.
14. Чернов П.П., Приходько И.Ю., Скороходов В.Н. и др. Исследование влияния температуры смотки полос в рулоны при холодной прокатке на образование дефектов поверхности полос. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2002. № 8–9. С. 101–108.
15. Mazur V.L. Preventing Surface Defects in the Uncoiling of Thin Steel Sheet. *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 12. P. 959–966. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091215120062>
16. Mazur V.L., Pargamonov E.A. Formation and Prevention of Flexure Defects at the Surface of Cold-Rolled Steel Strip. *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. № 8. P. 595–601. DOI: <https://doi.org/10.3103/S096709121608012X>
17. Мазур В.Л. Проблемы качества тонколистовой стали: предупреждение дефектов поверхности. В сб. «Наука про матеріали: досягнення та перспективи». У 2-х т. Т. 2 / Редкол.: Л.М. Лобанов (голова) та ін.; Київ: Академперіодика, 2018. С. 51–75.
18. Mazur V.L., Timoshenko V.I., Prihod'ko I.Yu. Stability Loss and Defects in Coils of Cold-Rolled Strip. *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49. No. 1. P. 58–65. DOI: <https://doi.org/10.3103/S096709121901011X>

Надійшла 31.08.2022



REFERENCES

1. Mazur, V.L., Nogovitsyn, O.V. (2019). Theory and Technology of Sheet Rolling. Numerical Analysis and Applications. London – New York. CRC Press. Taylor and Francis Group, 2019. 479 p.
2. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I., Prihod'ko, I.Yu. (2021). Theory and technology of rolling (stress-strain state of steel strip coils). Kyiv: Phoenix Publishing House, 416 p. [in Russian].
3. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I. (1979). Stress-strain state of rolls of cold-rolled strips. Message I. *Izvestiya vuzov. Ferrous Metallurgy*, no. 4, pp. 55–59 [in Russian].
4. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I. (1979). Stress-strain state of rolls of cold-rolled strips. Message II. *Izvestiya vuzov. Ferrous Metallurgy*, no. 6, pp. 52–55 [in Russian].
5. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I. (1982). Calculation of the stress state of rolled cylinders. *Mechanics of Composite Materials*. Riga: Zinatne, no. 5, pp. 880–886 [in Russian].
6. Timoshenko, M.V. (1996). Numerical simulation of heat transfer in multilayer structures with a generalized non-ideal contact. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal (IFZH)*, vol. 69, no. 5, pp. 773–778 [in Russian].
7. Mazur, V.L., Prihod'ko, I.Yu. (2020). Influence of Pulling Modes and Temperature of Coiling Cold-Rolled Strips. *Steel in Translation*, vol. 50, iss. 9, pp. 618–628.
8. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I., Prihod'ko, I.Yu. (2019). Efficient Cold Rolling and Coiling Modes. *Steel in Translation*, vol. 49, iss. 8, pp. 548–558.
9. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I., Prihod'ko, I.Yu. (2021). Influence of Annealing Modes in Bell Furnaces on the Stress-Strain State of Rolls of Cold Rolled Steel. *Steel in Translation*, iss. 9, pp. 648–657.
10. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I., Prihod'ko, I.Yu. (2018). Regulating the Coil Stress by Adjusting the Rigidity of the Winding Drum. *Steel in Translation*, vol. 48, iss. 8, pp. 528–535, doi: <https://doi.org/10.3103/S0967091218080090>

11. Mazur, V.L. (2018). Ensuring Specified Surface Roughness in the Production of Thin Cold-Rolled Steel Sheet. *Steel in Translation*, vol. 48, no. 1, pp. 49–54, doi: <https://doi.org/10.3103/S0967091218010102>
12. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I. (2018). Theory and technology of rolling (hydrodynamic effects of lubrication and surface microrelief). Kyiv: ID "ADEF Ukraine", 560 p. [in Russian].
13. Prihod'ko, I.Yu., Timoshenko, V.I., Chernov, P.P. et al. (2002). On the mechanism of influence of the rough surface of cold-rolled strips on the conditions of sticking of coils during annealing and the formation of surface defects. *Metallurgical and mining industry*, no. 8–9, pp. 92–101 [in Russian].
14. Chernov, P.P., Prihodko, I.Yu., Skorokhodov, V.N. et al. (2002). Investigation of the influence of the temperature of winding strips into rolls during cold rolling on the formation of defects in the surface of strips. *Metallurgical and mining industry*, no. 8–9, pp. 101–108 [in Russian].
15. Mazur, V.L. (2015). Preventing Surface Defects in the Uncoiling of Thin Steel Sheet. *Steel in Translation*, vol. 45, no. 12, pp. 959–966, doi: <https://doi.org/10.3103/S0967091215120062>
16. Mazur, V.L., Pargamonov, E.A. (2016). Formation and Prevention of Flexure Defects at the Surface of Cold-Rolled Steel Strip. *Steel in Translation*, vol. 46, no. 8, pp. 595–601, doi: <https://doi.org/10.3103/S096709121608012X>
17. Mazur, V.L. (2018). Quality problems of thin sheet steel: prevention of surface defects. *On Coll. "Materials Science: Achievements and Prospects". In 2 vols. Vol. 2 / Editor: L.M. Lobanov (head) et al; Kyiv: Akadempriodyka*, pp. 51–75 [in Russian].
18. Mazur, V.L., Timoshenko, V.I., Prihod'ko, I.Yu. (2019). Stability Loss and Defects in Coils of Cold-Rolled Strip. *Steel in Translation*, vol. 49, no. 1, pp. 58–65, doi: <https://doi.org/10.3103/S096709121901011X>

Received 31.08.2022

Summary

V.L. Mazur¹, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Chief Researcher, e-mail: prof.vlm@ukr.net

V.I. Tymoshenko², Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Phys.-Math. Sciences, Professor, Institute research vice-director, e-mail: vitymoshenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8588-2468>

I.Yu. Prihod'ko³, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Head of the Department, e-mail: isi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5651-8106>

¹*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

²*Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine (Dnipro, Ukraine)*

³*Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)*

Implementation of calculation methods in a specialized computer system of the stress-deformation and temperature state of steel strip coils

The theory of formation and transformation of the stress-deformation and temperature state of coils of hot-rolled and cold-rolled steel strips during their winding-unwinding in the processes of rolling, heat treatment, training, transportation, storage, and performance of other production operations at metallurgical plants has been developed. Mathematical models, algorithms and a computer system implementing them are proposed. A description of the possibilities of using this system when solving various tasks is given. In the computer system, an approach to assessing the influence of the parameters of the process of cold rolling and winding the stock into coils, the temperature and speed regimes of their heating and cooling during annealing in hood furnaces is considered. For the first time, the methodology for identifying patterns of influence of interturn gaps in coils on their stress-strain state was disclosed. The procedure for detecting the effects of cold rolling speed, temperature, tension of the strips rolled and wound into coils, and their surface roughness on the stress-strain state of the coils is shown. In detail, the implementation of new ideologies and approaches to solving the problem of determining the stress-strain state (STS) of rolls is shown in the computer system. Models and algorithms for calculating STS, which are the basis of the computer system, are developed on the basis of classic solutions in the field of materials science, theories of elasticity, metal pressure treatment, heat engineering, gas dynamics, numerical methods and other fields of knowledge. The computer system revealed the mechanisms of forming the temperature and stress-strain state of coils of steel strips in the processes of rolling, heating, isothermal aging and cooling during annealing in hood furnaces; the influence of the temperature and speed regimes of rolling and annealing on the occurrence of critical interturn pressures in the coils, which lead to surface defects of

the “bend line” (breaks) and defects in the shape of the coils, is taken into account. The possibilities of influencing the STS of coils during rolling by adjusting the tension of the strip, and during annealing by adjusting the duration of isothermal exposure and the rate of subsequent cooling of the rolls, are revealed. References to literary sources are provided, which detail the results of research on scientific and technical problems implemented in the computer system. In the computer system, methods of winding cold-rolled strips into coils are used, which exclude the loss of their stability and the formation of “bends”, subsidence, “bird” defects during the production of thin sheet steel in industrial conditions. Recommendations are given regarding the choice of a rational technology for the coil production of hot-rolled and cold-rolled strips, sheet metal. The developed solutions are implemented in the “CoilTemper3D” computer system and are used in production.

Keywords

Metallurgy, steel, production of strips, quality, coils, stress state, calculations, algorithms, computer systems, defect prevention.