

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ МЕТАЛУРГІЇ

Кафедра обробки металів тиском

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота / проект**

Другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему **Удосконалення технології виробництва холоднокатаного рулонного прокату на стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь» з метою зниження енерговитрат і підвищення якості продукції**

Виконав: студент II курсу, групи МЕТ-18-3мд  
спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Обробка металів тиском

(код і назва освітньої програми)

О.С. Пеленова

(ініціали та прізвище)

Керівник

доц. каф. ОМТ, с.н.с., к.т.н.

В.М. Проценко

Рецензент

зав. каф. ОМТ, д.т.н., проф.

О.В. Явтушенко

Запоріжжя  
2020

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
 ( повне найменування вищого навчального закладу )

Факультет \_\_\_\_\_ металургії \_\_\_\_\_  
 Кафедра \_\_\_\_\_ обробки металів тиском \_\_\_\_\_  
 Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ другий (магістерський) рівень \_\_\_\_\_  
 Спеціальність \_\_\_\_\_ 136 «Металургія» \_\_\_\_\_  
 (код та назва)  
 Спеціалізація \_\_\_\_\_  
 (код та назва)  
 Освітньо-професійна програма \_\_\_\_\_ Обробка металів тиском \_\_\_\_\_  
 (код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОМТ

\_\_\_\_\_ О.В. Явтушенко

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ / ПРОЕКТ СТУДЕНТЦІ

\_\_\_\_\_ Пеленовій Олені Сергіївні \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Удосконалення технології виробництва холоднокатаного рулонного прокату на стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь» з метою зниження енерговитрат і підвищення якості продукції.

керівник роботи \_\_\_\_\_ Проценко Віктор Максимович, к.т.н., с.н.с. \_\_\_\_\_,  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “16” 04. 19 р. № 583-с

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ 24 грудня 2019 року \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи: \_\_\_\_\_ Матеріали переддипломної практики, курсові проекти, технічна документація ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь», літературні джерела. \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Реферат. Вступ. Аналітична частина. Технологічна частина. Дослідницько-розрахункова частина. Спеціальна частина (індивідуальне завдання). Механічна частина. Економічна частина. Охорона праці.

Мета кваліфікаційної роботи - проаналізувати існуючі технології виробництва холоднокатаних штаб, запропонувати рекомендації по вдосконаленню технології і устаткування, що дозволяють зменшити витрати енергії, збільшити економію і підвищити якість продукції на НСХП 1680 в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Визначити основні тенденції розвитку виробництва холоднокатаних штаб, заходи щодо забезпечення економії енергії і якості продукції. Розробити технічні рішення щодо сортування сталі за вмістом вуглецю і збільшення товщини підкату гарячекатаної штаби з 2 до 2,2 мм. Виконати розрахунки енергосилових параметрів прокатки, контактних напружень в осередку деформації, продуктивності стана в залежності від швидкості прокатки, маси рулону тощо, валків кліті кварто на міцність і деформацію. Розробити заходи щодо захисту від небезпечні і шкідливі виробничі фактори. Виконати розрахунок собівартості продукції.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Схеми технології SVC (безперервна зміна профілю штаби), креслення чотирьохклітьового стана 1680, технологічна схема виробництва штаб на НСХП 1680 і розміщення обладнання на ньому, енергосилові параметри прокатки на стані 1680, схеми до розрахунку валків кліті кварто на міцність і деформацію.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ  | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---|---|----------------|------------------|
|   |   | завдання видав | завдання прийняв |
| Вступ, реферат, 1–7, висновки, перелік літератури | Проценко В.М., доц. каф. ОМТ              |                |                  |

7. Дата видачі завдання 30.09.2019 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи   | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1.    | Реферат, вступ, аналітична частина.   | 30.09.19-25.10.19             |          |
| 2.    | Технологічна, дослідницько-розрахункова і спеціальна частини.   | 28.10.19-29.11.19             |          |
| 3.    | Механічна, економічна частини, охорона праці, висновки, оформлення ПЗ, підготовка доповіді і презентації. | 02.12.19-11.01.20             |          |

Студент

(підпис)

**Пеленова О.С.**

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

**Проценко В.М.**

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

(підпис)

**Явтушенко О.В.**

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи (проекту) містить: 106 с., 41 рис., 12 табл.; використано літературних джерела 23.

Об'єкт дослідження – неперервний стан холодної прокатки НСХП 1680 ПАТ «Запоріжсталь» та технологія виробництва на ньому рулонного прокату з маловуглецевих марок сталі.

Мета магістерської роботи - проаналізувати існуючі технології виробництва холоднокатаних штаб, запропонувати рекомендації по вдосконаленню технології і устаткування, що дозволяють зменшити витрати енергії, збільшити економію і підвищити якість продукції на НСХП 1680 в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Методи розрахунків – стандартні методики розрахунків, які використовуються в прокатному виробництві. Розрахунки і комп'ютерне моделювання у системі САПР AutoCAD Mechanical 2019 та MathCAD Prime 5.

Отримані результати і їх новизна – визначено основні тенденції розвитку, вдосконалення технології виробництва штаб, забезпечення економії енергії і якості при холодному прокатуванні штаб. Запропоновано технічні рішення по вдосконаленню технології для виробництва холоднокатаних широких штаб в умовах НСХП 1680, а саме сортування підкату за вмістом вуглецю, що дозволить підвищити якість продукції при одночасному ресурсо- і енергозбереженні і, як наслідок, підвищити ефективність виробництва штаб в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Виконано розрахунок валків кліті кварто на міцність і деформацію із застосуванням програмного комплексу AutoCAD Mechanical 2019. Застосовано програмний комплекс MathCAD Prime 5 для розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації при холодному прокатуванні штаб. Отримані результати рекомендуються для впровадження на ПАТ «Запоріжсталь».

**ХОЛОДНА ПРОКАТКА ШТАБ, ПРОКАТНИЙ СТАН, ПРОКАТНІ ВАЛКИ, ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ, СОРТУВАННІ СТАЛІ, НСХП.**

## **ABSTRACT**

Explanatory note of qualification work (project) contains: 106 s., 41 fig., 12 table .; used literary sources 23.

The object of the study is the continuous state of cold rolling of NSHP 1680 PJSC "Zaporizhstal" and the technology of production of rolled metal of low carbon steel grades on it.

The purpose of the master's thesis is to analyze the existing technologies of production of cold-rolled staffs, to offer recommendations for the improvement of technology and equipment, which allow to reduce energy consumption, to increase the economy and to improve the quality of production at NSHP 1680 in the conditions of PJSC "Zaporizhstal".

Calculation methods - standard calculation methods used in the rolling industry. Calculations and Computer Simulation in AutoCAD Mechanical 2019 and MathCAD Prime 5.

The obtained results and their novelty - the main trends of development, improvement of technology of production of staffs, maintenance of energy and quality at cold rolling of staffs. Technical solutions for the improvement of technology for the production of cold-rolled wide staffs in the conditions of NSHP 1680 are proposed, namely sorting of carbon rolls, which will allow to improve the quality of products at the same time resource and energy saving and, as a consequence, to increase the efficiency of production of staffs in the conditions of Zaporizhzhia PJSC. .

The calculation of the quarto rolls for strength and deformation was performed using the AutoCAD Mechanical 2019. The MathCAD Prime 5 software complex was applied to calculate the normal contact stresses in the deformation cell during cold rolling of the headquarters. The obtained results are recommended for implementation at PJSC "Zaporizhstal".

**COLD ROLLING STAFF, ROLLING STATE, ROLLING ROLLS,  
ENERGY POWER PARAMETERS, ROLLING STEEL, NSHP**

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП .....  | 8  |
| 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....   | 10 |
| 1.1 Новітні досягнення в технології прокатного виробництва.....  | 10 |
| 1.2 Характеристика цеху холодної прокатки № 1 (ЦХП-1).....   | 20 |
| 1.3 Характеристика прокатного стану та технології прокатки .....   | 22 |
| 1.4 Характеристика марки сталі.....  | 33 |
| 1.5 Пропозиції щодо вдосконалення виробництва холоднокатаного прокату на ПАТ «Запоріжсталь».....                           | 33 |
| 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....   | 35 |
| 3 РОЗРАХУНОК НОРМАЛЬНИХ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПРОКАТУВАННІ ШТАБ .....                             | 41 |
| 4 ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СТАНІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ .....  | 50 |
| 4.1 Постановка задачі дослідження.....   | 50 |
| 4.2 Залежність продуктивності прокатного стана від швидкості прокатки при різній масі рулонів штаби, що прокатується ..... | 55 |
| 4.3 Вплив темпів розгону і гальмування двигунів на продуктивність прокатного стана .....                                   | 59 |
| 4.4 Вплив величини зниженої швидкості прокатки при проходженні зварних швів на продуктивність прокатного стана .....       | 62 |
| 4.5 Вплив часу допоміжних і заправочних операцій на середньогодинну продуктивність прокатного стана.....                   | 66 |
| 4.6 Вплив маси гарячекатаного рулону на середньогодинну продуктивність прокатного стана.....                               | 69 |
| 4.7 Вплив товщини штаби на середньогодинну продуктивність прокатного стана.....  | 72 |

|  |     |
|--|-----|
|  | 7   |
| 4.8 Вплив ширини штаби на середньогодинну продуктивність прокатного стану.....                             | 75  |
| 5 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА .....  | 80  |
| 5.1 Розрахунок валків листопрокатних станів на міцність і деформацію в середовищі AutoCAD Mechanical ..... | 80  |
| 5.1.1 Вступ.....   | 80  |
| 5.1.2 Постановка задачі.....   | 81  |
| 5.1.3 Методика дослідження .....   | 82  |
| 5.1.4 Результати досліджень .....  | 89  |
| 6 АНАЛІЗ СОБІВАРТОСТІ ПРОДУКЦІЇ .....  | 95  |
| 7. ОХОРОНА ПРАЦІ .....   | 99  |
| 7.1 Технічні рішення відносно безпеки експлуатації безперервного 4-х клітьового стану «1680» .....         | 99  |
| ВИСНОВКИ.....  | 102 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....   | 105 |
| ДОДАТОК А.....   | 107 |
| Публікація за темою кваліфікаційної магістерської роботи.....  | 107 |

## ВСТУП

Процеси виробництва листової сталі є складними і багатофакторними. Формування якості листової сталі починається на стадії її виплавки. В прокатних переділах завершується формування її властивостей. Процеси виробництва листового прокату характеризуються значною матеріало- і енергоємністю, вимагають значних трудовитрат. Проведення експериментів на технологічному обладнанні не завжди виправдано, оскільки може призвести до серйозних збоїв в роботі устаткування, втраті продуктивності і невиправному браку продукції. Тому математичне моделювання процесів виробництва прокату (і, зокрема, із застосуванням комп'ютерних технологій) є кращим методом їх дослідження і оптимізації.

Для підвищення якості своєї продукції прокатники у всьому світі, перш за все в Японії, Німеччині, США, а також в країнах Латинської Америки, Індії і Китаю, давно приступили до глобальної модернізації прокатного обладнання. По всьому світу розповсюдилися такі технології як "литво-прокатки" CVC - безперервне регулювання товщини штаби в процесі прокатки.

В результаті модернізації існуючих прокатних станів і, перш за все, прокатних клітей якість листового і штабового прокату значно покращилася. Проте, не дивлячись на успіхи, досягти тієї якості, якої вимагають сьогодні від прокатників замовники, поки не вдається.

Аналіз численних прикладів модернізації прокатного обладнання, приведених в літературі, показує, що модернізація не в змозі кардинально змінити ситуацію в боротьбі за якість прокату. Причини цього закладені в неможливості зміни традиційної схеми прокатної кліти, яка має істотні конструктивні недоліки.

В даний час у світі все більший розвиток отримує холодне прокатування листової сталі, здійснюване на неперервних широкоштабових станах. На цих станах прокатують листи і штаби товщиною 0,5 - 1,2 і шириною до 1850 - 2150 мм.



Холоднокатаний рулонний прокат товщиною 0,5 - 1,2 мм і шириною 800-1550 мм з маловуглецевих марок сталі користується на ПАТ «Запоріжсталь» найбільшим попитом у закордонних і вітчизняних споживачів. Він виробляється відповідно до міжнародного стандарту EN ISO 9001:2000 і ДСТУ 2834-94. Проте, проблема зменшення відходів і покращення якості продукції залишається актуальною на сьогоднішній день. Тому дана магістерська робота присвячена вирішенню саме цих проблем.

В даний час до продукції широкоштабових станів холодної прокатки висуваються жорсткі вимоги, пов'язані з необхідністю підвищення її конкурентоспроможності на світовому ринку, потреби якого в останнє десятиліття істотно змінилися.

Маловуглецева сталь 08кп, має наступний хімічний склад (ГОСТ 1050-88), % мас.: С 0,05-0,12; Мп 0,25-0,5; Si 0,03; S 0,04; P 0,035; Ni 0,3; Cu 0,3; Cr 0,1.

Літературний аналіз існуючих технологічних схем виробництва широкоштабової холоднокатаної сталі показує на стані першого покоління НСХП 1680 ПАТ «Запоріжсталь» значна частина устаткування морально застаріла і фізично зношена. Тому для продовження термінів експлуатації і підтримки конкурентоспроможності продукції необхідно удосконалення технології холодного прокатування широких штаб.

Традиційні шляхи удосконалення технології і устаткування листових станів, направлені на покращення механічних властивостей і розмірів готового прокату, підвищення продуктивності агрегатів, зниження витрат металу на переділі, розглядаються як непрямий метод зниження енерговитрат. Цим обґрунтовується актуальність даного дипломного проекту.

Мета магістерської роботи - проаналізувати існуючі технології виробництва холоднокатаних штаб, запропонувати рекомендації по вдосконаленню технології і устаткування, що дозволяють зменшити витрати енергії, розширити сортамент і підвищити якість продукції на ШСГП 1680 в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

## **1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА**

### **1.1 Новітні досягнення в технології прокатного виробництва**

Прогрес в прокатному виробництві грає визначальну роль в машинобудуванні, рівень якого характеризує стан вітчизняної економіки. Технології прокатки, ступінь їх досконалості і новизни, технічні характеристики прокатного устаткування в значній мірі визначають якість готового прокату.

Гаряча і холодна прокатка широких штаб є завершальними операціями в процесі виробництва прокату. Саме на цій стадії виникають проблеми з якістю, від якої залежить ціна і об'єм реалізації готової продукції.

Метою модернізації сучасного листопрокатного виробництва є, перш за все, підвищення якості продукції і продуктивності прокатних станів. Для цього встановлюються гідронатискні пристрої (ГНП) замість традиційних електромеханічних, упроваджуються системи противигину валків, осьового і кутового зрушення валків, використовуються досконаліші схеми автоматичного регулювання товщини штаби.

У літературі [1] звертається увага на такі технології, як литво тонких слябів, прокатка надтонкої гарячекатаної штаби, безперервне литво і прокатка товстого листа, прокатні кліті з розширеним діапазоном настройки, нові системи автоматизації. Важливим технічним досягненням на думку фахівців є створення нового безперервного агрегату литва і прокатки Luna на заводі фірми ABS (Acciaierie Bertoli Safau, Удіне/Італія).

Нова технологія включає безперервний процес литва, прокатки, відпалу, випробування, правки, дробеструйної обробки, обробки і упаковки прокату. Міні-завод розрахований на випуск круглих і квадратних заготовок з вуглецевих, низьколегованих, корозійно стійких, підшипникових і пружинних сталей для машинобудування і автомобільної промисловості.

Розроблена фірмою SMS-DEMAG (Дюсельдорф) технологія високоякісної прокатки (High-Tech-Rolling) представляє набір оптимально узгоджених між собою модулів в замкнутій системі [1]. Технологія SVC

(безперервна зміна профілю штаби) займає в ній ключову позицію. High-Tech-Rolling є сукупністю виконавчих механізмів і систем регулювання. Для регулювання товщини штаби передбачені гідравлічні натискні механізми, а для отримання бажаного профілю використовується технологія бочкоподібності валка, що безступінчасто змінюється. За допомогою SVC на кожній кліті точно встановлюються значення бочкоподібності, закладені в програмі прокатки. У поєднанні з швидкореагуючим пристроєм противигину валків виходить виконавська система з високою динамікою регулювання товщини і профілю штаби. На рис. 1.1 показана стратегія виробництва штаб, а на рис. 1.2 - схема регулювання товщини, профілю і планшетності на широкоштабовому стані гарячої прокатки фірми Thyssen Stahl AG в Беекерверті (Німеччина).

На клітках F3 - F5 встановлені системи SVC, а на клітках F3 – F7 системи вигину робочих валків. Задані ЕОМ, що управляє, (див. рис. 1.2) виробничі дані приймаються ЕОМ регулювання міжвалкового зазору валків і товщини штаби і ЕОМ регулювання профілю і планшетності штаби.

ЕОМ регулювання міжвалкового зазору і товщини штаби розраховує значення для попередньої установки міжвалкового зазору валків і передає відповідні значення на систему регулювання натискним гідравлічним механізмом клітей F1-F7. ЕОМ профілю і планшетності розраховує, виходячи з прийнятих даних, значення для попередньої установки міжвалкового зазору валків і видає їх на пристрій позиційного регулювання системи переміщення SVC. Така ж інформація поступає на регулювальні контури профілю, які у свою чергу передають задані значення для відповідної системи противигину робочих валків.

Сигнали коректування, що поступають з вимірювального приладу планшетності, приймаються відповідними системами регулювання, після чого спрацьовують системи противигину робочих валків [1].

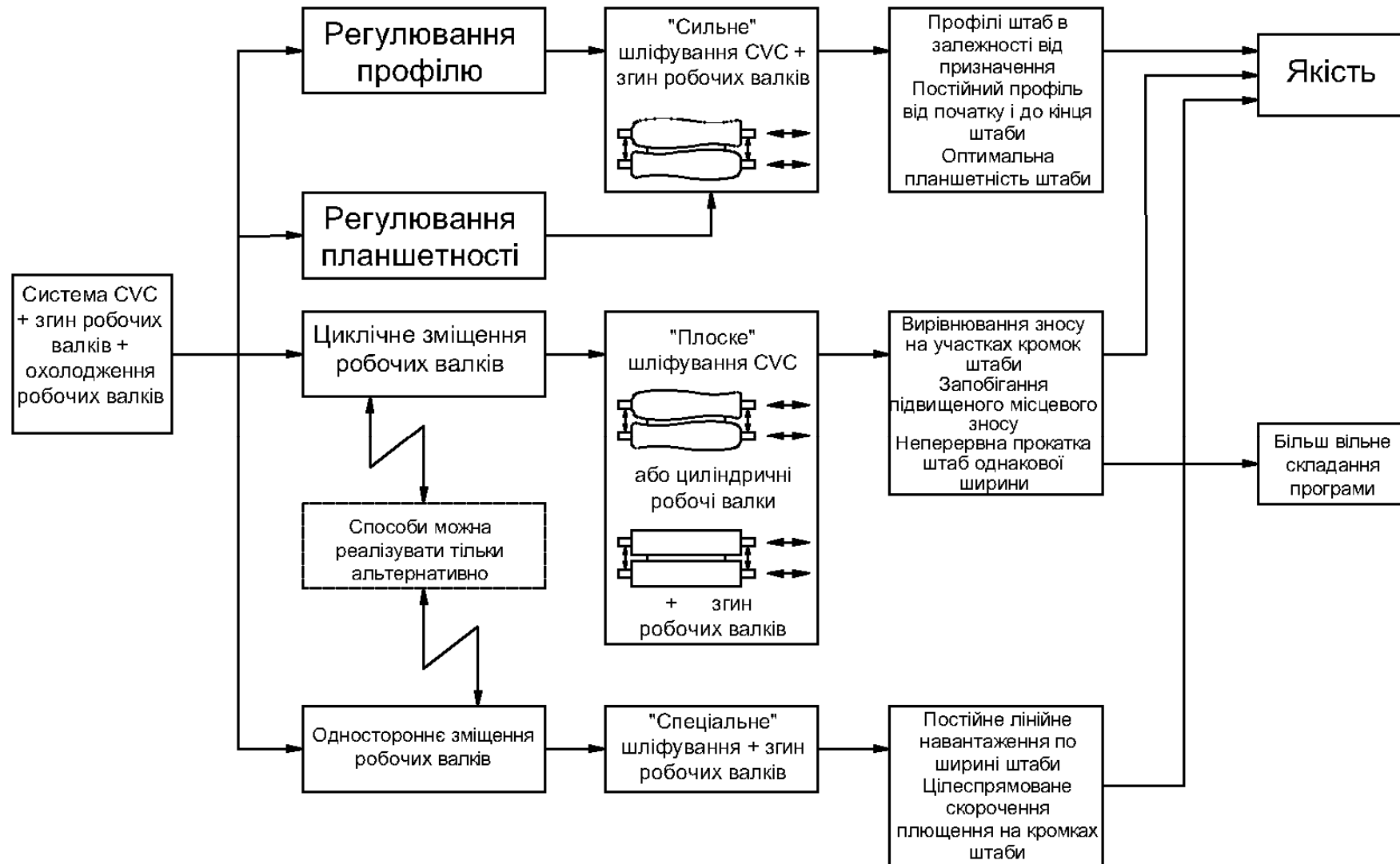
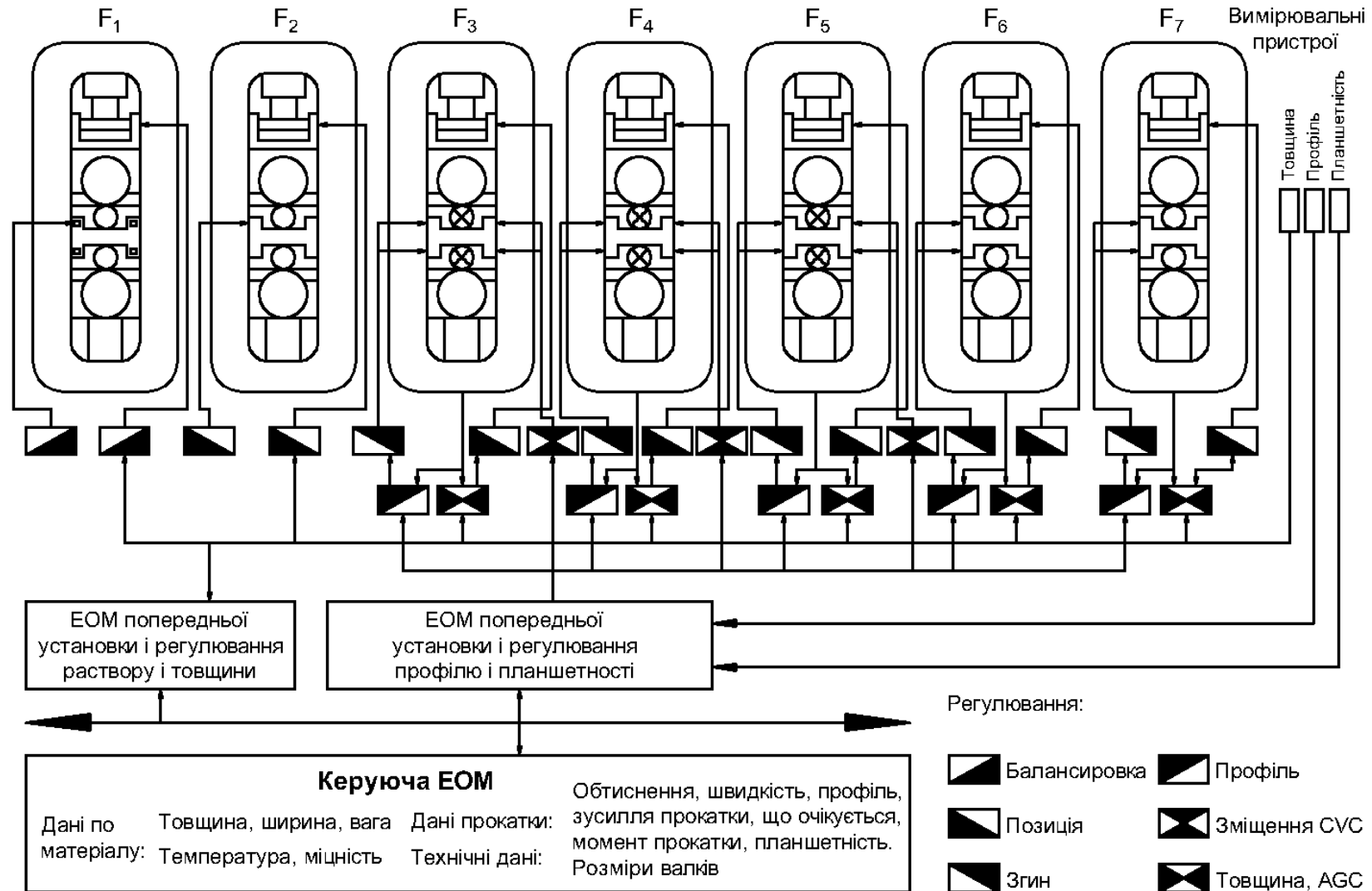


Рисунок 1.1 – Стратегія виробництва штаб найвищої якості



**Рисунок 1.2** – Інтегровані пристрої регулювання товщини, профілю і планшетності на широкоштабовому стані гарячої прокатки фірми Thyssen Stahl AG в Бекерверте

Принцип дії системи CVC полягає в наступному (рис. 1.3) [1].

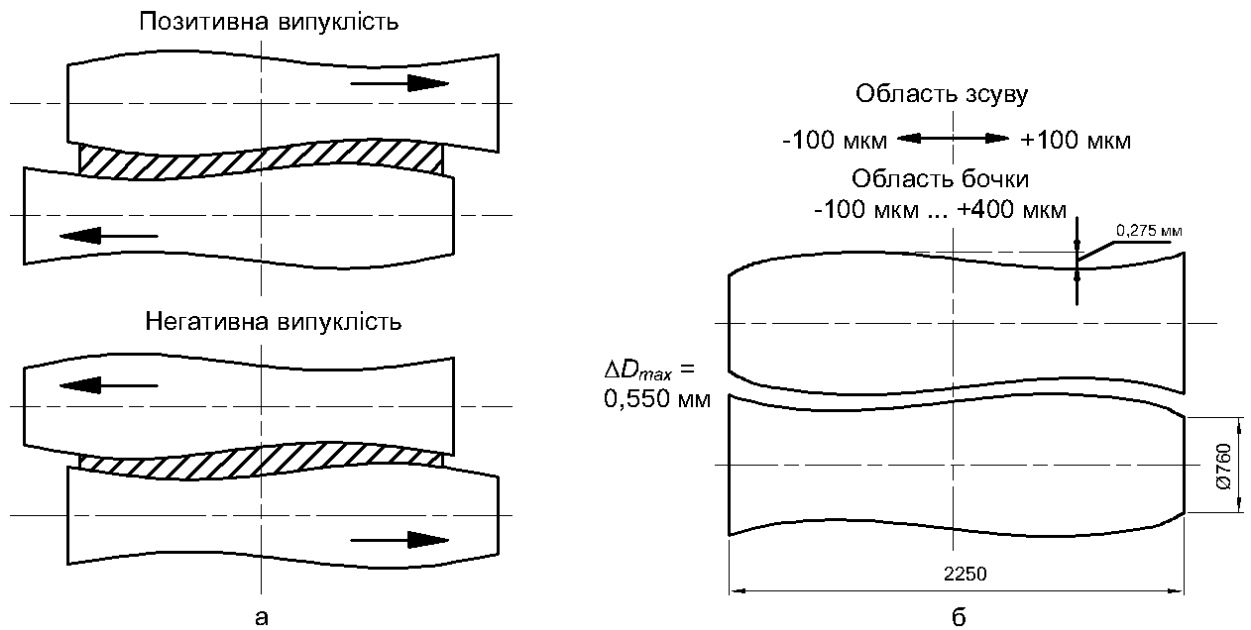
Верхній і нижній робочі валки мають S - образний профіль, ідентичний для обох валків. Валки зміщені щодо один одного на  $180^\circ$ , тому вони доповнюють один одного, утворюючи параболічно симетричний контур міжвалкового зазору. При подовжньому взаємному зсуві відбувається *геометрична* зміна контуру міжвалкового зазору з ефектом негативної або позитивної випуклості валка залежно від напрямку зсуву. Оскільки сумарний зсув вибирається плавно, то випуклість валка змінюється безперервно відповідно до умов прокатки.

Відповідно до технології CVC в перших клітках стана гарячої прокатки форма міжвалкового зазору настроюється на потрібний профіль штаби, який витримується в останніх клітках, що забезпечує її планшетність. Для цього використовується *противигин* робочих валків. На рис. 1.4 показано співвідношення між необхідною зміною зусиль противигину і прокатки залежно від ширини штаби. Таким же чином автоматично витримується постійним контур міжвалкового зазору і профіль штаби при зміні зусилля прокатки по довжині штаби.

При односторонній хвилястості кромки автоматично приводяться в дію натискні механізми останньої клітки, які повертають валки до тих пір, поки штаба не стане рівною.

Із-за місцевого зносу робочих валків, особливо при прокатуванні штаб з високоміцного матеріалу, в профілі штаби можуть виникати випуклі плями або потовщення на кромках штаби, які на стані холодної прокатки приводять до непоправних дефектів планшетності, а на стані гарячої прокатки - до поперечної різнотовщинності штаби. Для усунення даного дефекту застосовують циклічне зрушення робочих валків.

Із-за пружного сплющення валків в області кромки штаби часто виникає зменшення профілю. Це явище усувають шліфівкою контура робочого валка на певну довжину. При максимальній ширині штаби валки мають мінімальну випуклість бочки.



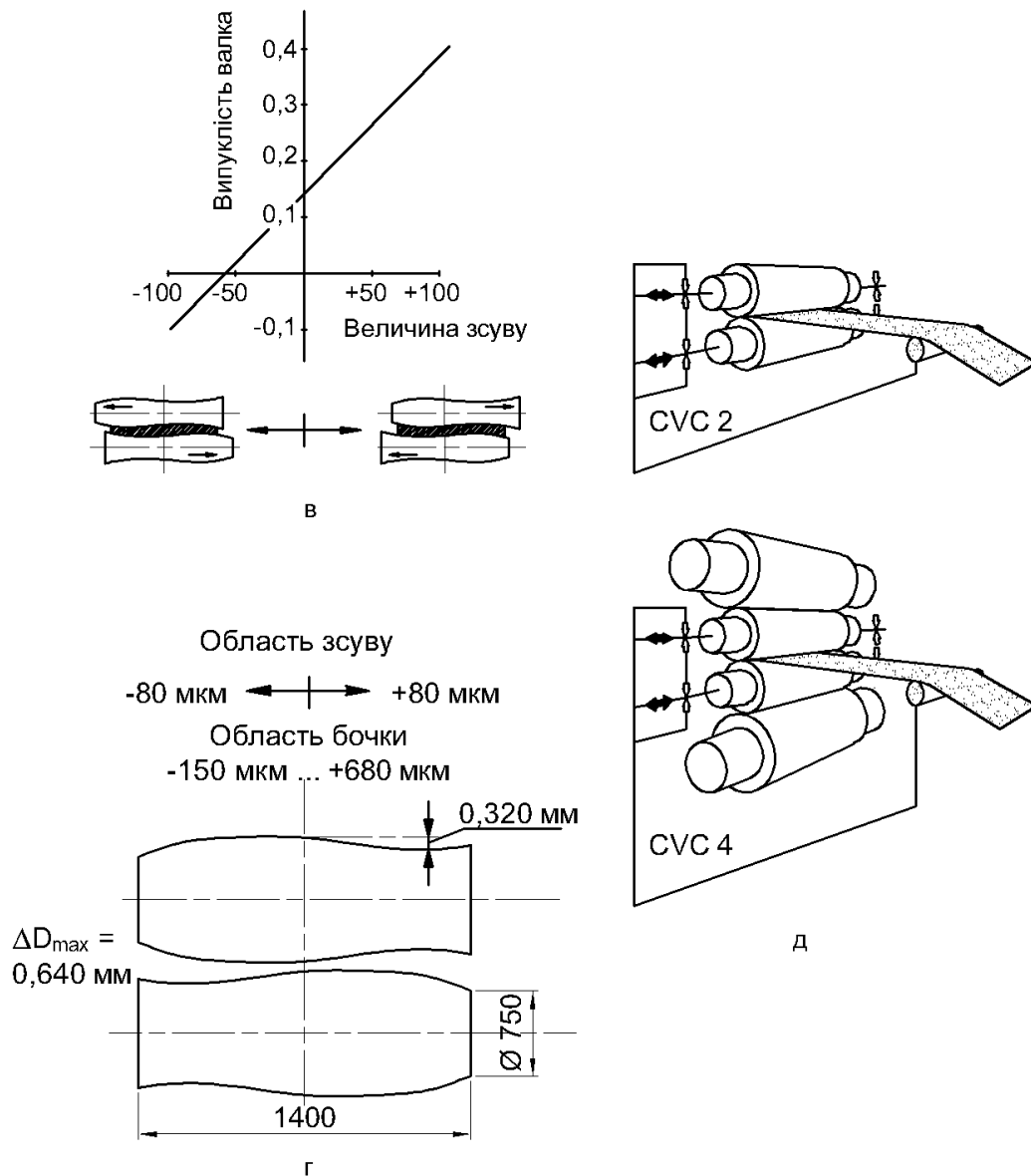
а - принцип неперервної зміни штаби (НСШ); б - конструкція валків НЗШ для стану гарячої прокатки; в - залежність між величиною зсуву і регулюємою випуклістю за допомогою системи НЗШ; г - конструкція валків НЗШ для дрсирувального стану; д - застосування системи SVC у різних схемах прокатки штаб; е - прокатний стан з SVC; ж - осьове переміщення валків в підшипниках Моргойла на кліті ДУО

**Рисунок 1.3** - Принцип дії системи SVC

У разі прокатки вузьких штаб, при зрушенні валків відбувається зміна випуклості валка - вона збільшується. Таким чином, компенсується природний прогин робочих і опорних валків і створюються умови для регулювання планшетності на останній кліті [1].

У тандем - станах холодної прокатки планшетність штаби при правильному розподілі обтиснення визначається останньою кліттю, тому в неї вбудована система SVC, що працює спільно з системами противигину робочих валків і натискних гідравлічних механізмів.

Як приклади реалізації технології High-Tech-Rolling і технології SVC фірмою СМС Шлоеманн Зімаг Акциенгезельшафт можна привести широкоштабовий стан гарячої прокатки 2050 мм (введений в експлуатацію в 1990 р.) і стан холодної прокатки (1988 р.) в Китаї.

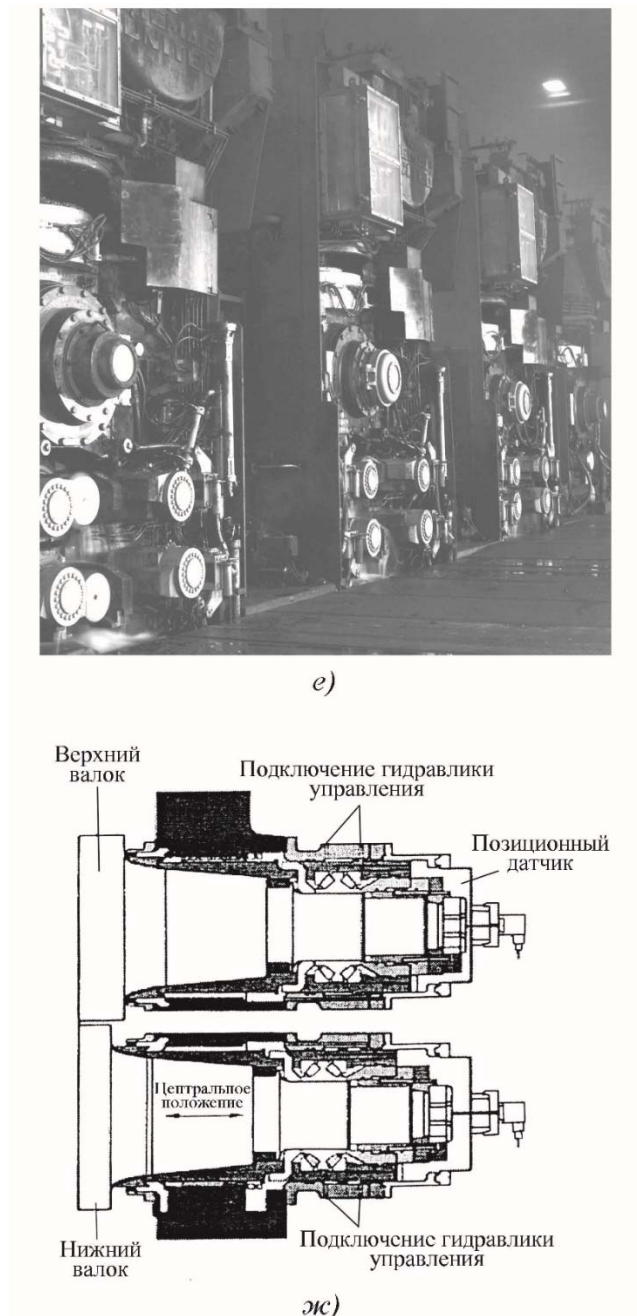


**Рисунок 1.3 - Продовження**

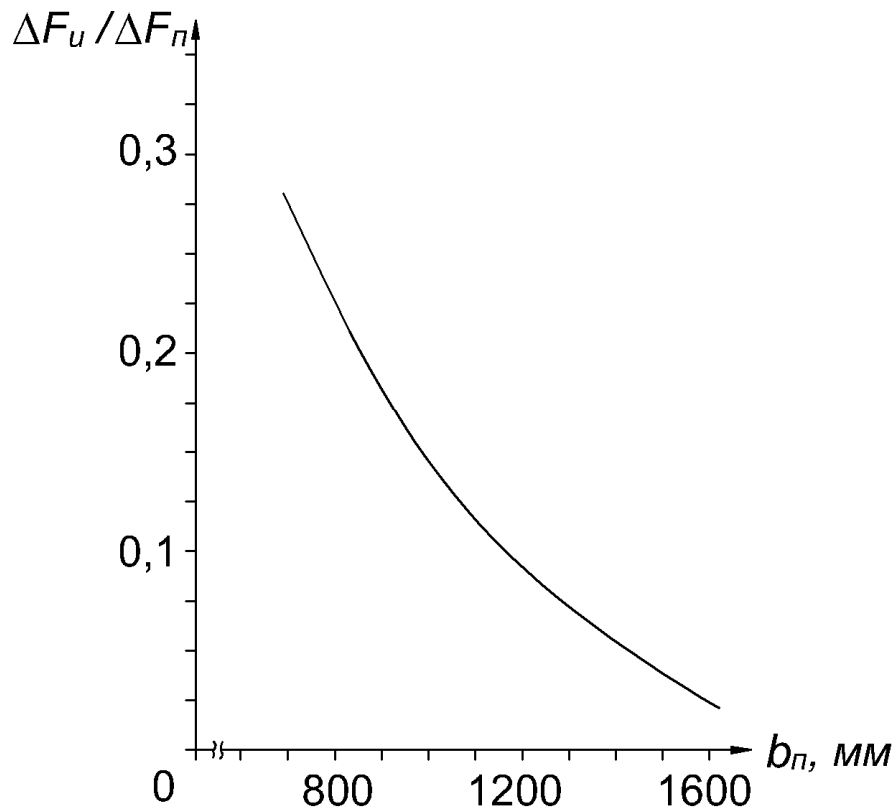
На стані гарячої прокатки, на ділянці чорнової групи, застосовані гідронатискні механізми, що використовуються як установочні органи в автоматичній системі регулювання ширини прокату. High-Tech-Rolling в чистовій групі клітей представлена установочними і регулюючими системами: гідронатискними механізмами, системою CVC і системою противигину робочих валків, спільна робота яких забезпечує високу якість кінцевої продукції (прокатки в полі допуску, мінімальна подовжня і поперечна різнотовщинність, висока планшетність). Усі сім чистових клітей оснащені гідромеханічними механізмами. Електромеханічні установочні



механізми служать тільки для компенсації зносу робочих валків і для переміщення валків при перевалці. Максимальне зусилля прокатки складає 45 МН на клітях F1 - F3 і 40 МН на F4 - F7. Швидкість електромеханічної установки валків 5 мм/с, гідравлічної, - 3 мм/с. Всі чистові кліті оснащені системами SVC і системами вигину робочих валків. На рис. 1.5 показана сучасна кліть F3 [1].



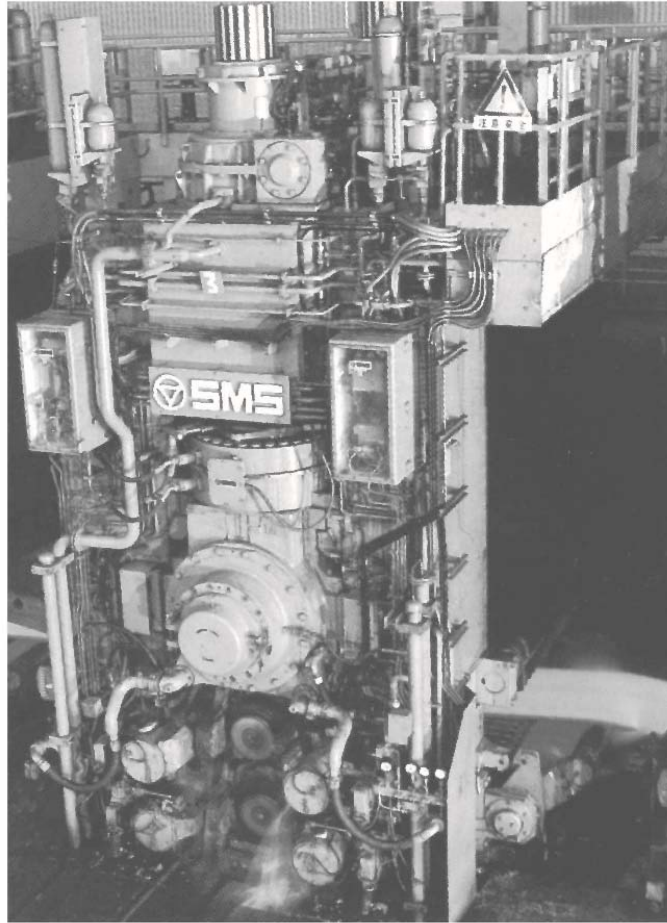
**Рисунок 1.3 - Закінчення**



**Рисунок 1.4** – Залежність коефіцієнта кореляції ( $\Delta F_u / \Delta F_n$ ) від ширини штаби:

$\Delta F_u$  і  $\Delta F_n$  – зміна зусилля відповідно противигину і прокатки

На п'ятиклітьовому стані холодної прокатки фірми Шлоеманн-Зімаг прокатують травлену гарячекатану штабу завтовшки 1,8...6,0 мм з отриманням холоднокатаної штаби товщиною 0,3...3,5 мм, а також високолеговану сталеву штабу з високою межею міцності (рис. 1.6). Ширина штаби складає 900... 1850 мм; максимальна швидкість прокатки 1900 м/хвил; ємкість накопичувача - 720 м. Для отримання максимальної якості (по планшетності і допускам) стан обладнаний системою SVC на кліті № 5 для безступінчастого регулювання міжвалкового зазору [1].



**Рисунок 1.5** – Сучасна прокатна кліть F3



**Рисунок 1.6** – Неперервний стан – тандем з пристроями для перевалки валків

## 1.2 Характеристика цеху холодної прокатки № 1 (ЦХП-1)

Цех складається з 6-ти основних технологічних відділень: травильних, прокатне, термічне, відділення обробки, відділення по виробництву жерсті і металів з покриттями і відділення з виробництва прокату з нержавіючих марок сталі (в даний час не працює).

Травильних відділення складається з трьох безперервних травильних агрегатів (НТА-1, 2 і 3). Прокатне відділення в своєму складі має три прокатні стани: безперервний 4-клітьовою стан «Тандем-1680»; реверсивний стан 1680 і реверсивний стан 1200. До складу термічного відділення входить 16 блоків (252 стенди) одностопних ковпакових печей, опалювальних природним газом. Відділення обробки включає в себе дресирування стани 1700-1, 1700-2 і «Кварто-1680», три агрегати поперечного різання (АПР-1, 2 і 3), два агрегати поздовжньої порізки (АПР-4 і 5). До складу відділення з виробництва жерсті і металів з покриттями входить комплекс обладнання (агрегати розпуску, прокатні стани, термічні печі, чистильно-мийні агрегати, дресирування стани, агрегати гарячого лудіння), призначений для випуску чорної, білої жерсті і стрічки.

Вихідною заготовлею для ЦХП-1 є гарячекатані рулони з вуглецевої і низьколегованої сталі розмірами 2-4×1000-1500 мм. Гарячекатані рулони надходять з ЦГПТЛ в травильне відділення, де в одному з безперервних травильних агрегатів проходять процес зняття окалини з поверхні (травлення). Потім в прокатному відділенні рулони прокатують на задану величину на одному зі станів за існуючими режимам обтиснень. У термічному відділенні холоднокатані рулони піддаються рекристалізаційному відпалу і передаються у відділення обробки. На дресирувальних станах холоднокатані рулони дресируються (прокочуються з невеликими обтисканнями), а потім, в залежності від замовлення, промаслюється і упаковуються на ділянці упаковки або без промаслювання передаються для подальшого переділу на агрегати поздовжньої або

поперечної різання. На зазначених агрегатах рулони ріжуться на листи або розпускаються на більш вузькі штаби.

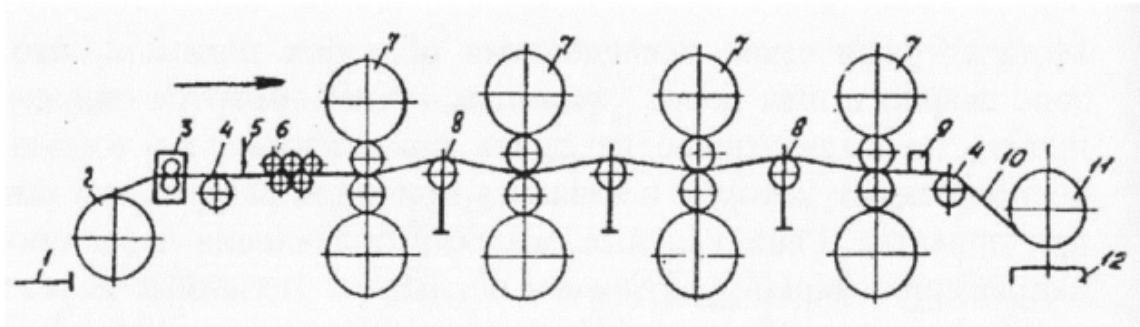
Продукція цеху: холоднокатаний прокат в листах і рулонах розмірами 0,5-2,0x1000-1500x1400-3950 мм, жерсть в рулонах розмірами: 0,20-0,40x120-512 мм. Норма витрати металу на придатний прокат: 1092 - 1200 кг / т (залежно від марки сталі та виду продукції).

Виробнича потужність основних агрегатів ЦХП-1:

- \* «Тандем-1680» - 936 тис. тонн в рік;
- \* Реверс. 1680 - 126 тис. тонн в рік;
- \* Реверс. 1200 - 179 тис. тонн в рік;
- \* Дрес. 1700-1 - 650 тис. тонн в рік;
- \* Дрес. 1700-2 - 350 тис. тонн в рік;
- \* АПР-1 - 300 тис. тонн в рік;
- \* АПР-2 - 300 тис. тонн в рік;
- \* АПР-3 - 219,6 тис. тонн в рік;
- \* АПР-4 - 66 тис. тонн в рік;
- \* АПР-5 - 334,8 тис. тонн в рік.

### 1.3 Характеристика прокатного стану та технології прокатки

Чотирьох клітьовий НСХП 1680 призначений для прокатки холоднокатаного листа товщиною 0,5-2,0 мм, довжина бочки валків становить 1680 мм, швидкість прокатки - до 10 м / с, діаметр робочих і опорних валків становить 510 і 1210 мм. Для підкату використовується гарячекатана смуга товщиною 2-3,8 мм з масою рулону до 15 т. Робочі валки приводяться від електродвигуна потужністю 3300 кВт через шестеренних кліть. Сумарне обтиснення на чотирьох клітьовий станах досягає 80%. Чотирьох клітьовий НСХП є основним постачальником холоднокатаної листової сталі.



1 – приймальний транспортер; 2 – розмотувач; 3 – відгібач решт рулонів; 4 – обвідний ролик; 5 – індикатор шва; 6 – натяжний ролик; 7 – чотирьохвалкові кліті; 8 – ролик тензометричного пристрою; 9 – товщиномір; 10 – готова штаба; 11 – моталки; 12 – прибиральний транспортер

**Рисунок 1.7-** Схема розташування обладнання безперервного чотирьохклітьового стану порулонної холодної прокатки

У тих випадках, коли протравлений рулон для НСХП складається з 2 гарячекатаних штаб, зварених між собою, прокатка зварних швів здійснюється на зниженій швидкості.

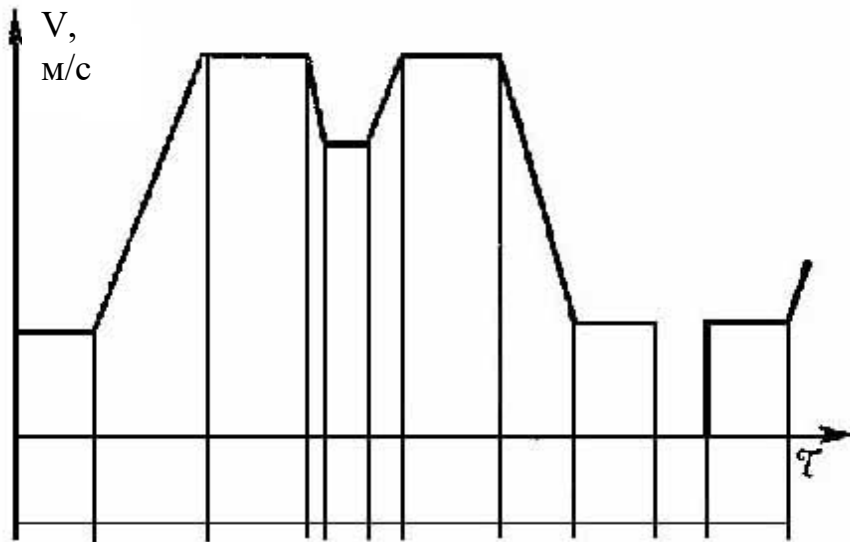
При прокатці на НСХП забезпечується отримання необхідних розмірів штаби по товщині, необхідної точності геометричних розмірів і форми штаби і заданих механічних властивостей.

Отримання необхідних розмірів штаби досягається шляхом прокатки за один пропуск в кожній кліті НСХП згідно розрахованому режиму і характеризується рядом особливостей.

Процес прокатки на НСХП здійснюється зі змінною швидкістю. На рис. 1.8 зображена діаграма зміни швидкості при прокатці одного рулону, що складається з двох гарячекатаних штаб.

Після заправки штаби в першу кліть прокатка протягом часу  $t_1$  ведеться на постійній заправній швидкості до тих пір, поки передній кінець штаби пройде всі кліті і на моталці утворюється 2-3 витка штаби. Потім швидкість протягом часу  $t_2$  підвищується до робочої, і за час  $t_3$  рулон прокочується з постійною робочою швидкістю. Перед звареним швом швидкість прокатки сповільнюється протягом часу  $t_4$  до швидкості прокатки зварного шва і за час  $t_5$  не змінюється. Потім протягом часу  $t_6$  відбувається розгін штаби до робочої швидкості, і далі все повторюється, як зображено на рис. 1.8. При підході заднього кінця протягом часу  $t_7$  відбувається уповільнення стану, при цьому швидкість прокатки зменшується з робочою до заправної, після чого задній кінець прокочується з постійною заправною швидкістю протягом часу  $t_8$ . Після паузи протягом часу  $t_9$  (від кінця прокатки рулону в першій кліті до моменту завдання переднього кінця іншої штаби в першу кліть) починається прокат наступного рулону згідно розглянутої діаграми.

Таким чином, значна частина штаби прокочується зі змінною швидкістю, що істотно впливає на параметри процесу прокатки: товщину штаб, коефіцієнт тертя, силу прокатки, обтиснення, натяг і ін.



**Рисунок 1.8** - Діаграма швидкості прокатки на безперервному стані холодної прокатки 1680 штаби зі зварним швом

Прокатка зварних швів на сповільненій швидкості пояснюється нестабільністю механічних властивостей швів і зміною товщини. Якщо при проходженні зварних швів між валками швидкість прокатки не знижувати, то це веде до сильних ударів і може статися розрив штаби. Під час проходження зварного шва різко збільшується сила прокатки, виходить велика пружна деформація кліті і шов обжимається менше, ніж решта смуга. Після виходу шва з валків сила прокатки різко зменшується, що веде до зміни пружної деформації кліті і до удару валків по смузі. Крім цього, при уповільненні і збільшенні швидкості обертання валків стану обурення, пов'язані зі швидкісним ефектом, викликають відхилення розмірів товщини штаби в поздовжньому і поперечному напрямках.

Щоб не знижувати швидкість прокатки при проходженні зварних швів, необхідно забезпечити однакові механічні властивості металу шва і металу штаб і мінімальну різновтовщинність підкату. Вирівнювання меж плинності матеріалів шва і матеріалу штаби може бути досягнуто зменшенням обтиску по шву за рахунок зняття грата на мінус. При цьому товщина шва змінюється за плавною кривою, що забезпечує безударне заповнення осередку



деформації, знижуються додаткові обурення в процесі прокатки і шов можна прокатувати на робочій швидкості.

Крім цього, прокатку зварних швів на робочій швидкості можна вести в разі косоного розташування зварного шва.

Для зменшення часу несталого процесу прокатки при розгоні і уповільненні швидкості валків стану застосовують двигуни, що забезпечують швидкий розгін і уповільнення.

Процес багаторазового обтиснення штаби на НСХП призводить до значного її розігріву і до необхідності примусового охолодження валків і штаби. Зазвичай охолоджуюче середовище і є технологічне мастило. Мастило при холодній прокатці знижує коефіцієнт тертя між валками і прокатується штабою до 0,02-0,06, завдяки чому зменшуються опір деформації і сила прокатки, яка зменшує прогин валків і пружну деформацію кліті. Таким чином, при одній і тій же установці валків прокатка з мастилом забезпечує більше обтиснення. Мастило при холодній прокатці знижує витрату енергії, зменшує знос валків і підвищує якість листової сталі.

Мастило утворює ковзний шар між валками і прокочується смугою: чим надійніше поділ поверхневого ковзання, тим вище ефективність мастила. Ефективність мастила характеризується наявністю поверхнево-активних речовин, здатних адсорбуватися на поверхні ковзання з утворенням міцних мастильних плівок. Мастило повинна добре прилипати до валянням, забезпечуючи рівномірну плівку між валками і прокочується смугою, і під час прокатки не повинна видавлюватися. Мастило повинна також легко віддалятися з поверхні листової сталі після прокатки. З практичної роботи НСХП і багатьох досліджень відомо, що найкращі результати як мастильно-охолоджуючі рідини дають емульсії на основі мінеральних мастил. При холодній прокатки вуглецевих марок сталей для змащення і охолодження валків широко застосовується емульсія, виготовлена з емульсолів різних марок: Е-2Б, Т, ІС - 20, ПКС - 1 та ін. Така емульсія має наступний склад: 5 ... 7% емульсолів , 3% кальцинованої соди і 91–95% підігрітої води. Склад

емульсолів наступний: Е-2 (Б) - розчин натрієвих мил нафтенових кислот 7 ... 10%, мінеральне масло І-20А 75– 80%; Т - мінеральне масло І-20А 85%, тріетаноламінова сіль олеїнової кислоти 12%; СЖК С10– С20 10%; тріетаноламін 4%, стеарокс - 6,5%.

Для прокатки нержавіючих і високолегованих марок сталей з високою межею міцності рекомендується застосовувати високов'язкі мінеральні масла, мастила на жировій основі, що подаються в чистому вигляді або у вигляді водемастильної дисперсії.

Ефективність мастил залежить не тільки від правильного вибору їх складу, але і від способу подачі на штаби і валки. Емульсія подається з обох сторін робочої кліті в місця контакту валків і штаби і на прокатуваний метал. Все НСХП обладнані досить складними і громіздкими системами для охолодження валків і подачі технологічного мастила на штабу під час прокатки. Ці системи працюють по замкнутому циклу, після використання залишки емульсії направляють в збірник з метою її повторного використання. Для приготування емульсії необхідної концентрації і подачі її на валки робочих клітей є спеціальна установка. На стан емульсію подають насосами. Для очищення емульсії від забруднень є фільтри і магнітні сепаратори. Для охолодження емульсії установка обладнана охолоджувачами.

Необхідною умовою нормального процесу холодної прокатки є сталість обсягів металу, що проходять через кліть в секунду, яке описується рівняннями

$$v_1 \cdot h_1 = v_2 \cdot h_2 = v_3 \cdot h_3 = v_4 \cdot h_4 \quad (1.1)$$

де  $v_1, v_2, v_3, v_4$  - швидкості виходу металу з валків;

$h_1, h_2, h_3, h_4$  - товщини штаб на виході з кліті.

Холодна прокатка на НСХП здійснюється зі значним натягом, яке знижує силу прокатки, стабілізує процес прокатки і служить в якості регулюючого чинника товщини штаби. Натяг, що впливає на силу прокатки  $a$ , отже, на пружну деформацію валків, може бути керуючим параметром по

відношенню до форми: зростання загального натягу впливає на формоутворення і можлива поява короба, а зменшення натягу сприяє утворенню хвилястості по краях.

Рівень міжклітьових натягів вибирають так, щоб не перевищити критичних напружень. Питомі натяги між клітьми складають (0,3-0,6) ст.

Зазвичай на штабу в першій кліті діє тільки передній натяг, а в останній і проміжних клітьх діє передній і задній натяг. Натяг між клітьми створюється за рахунок неузгодженості швидкостей, а передній натяг в останній кліті - моталкою.

Суттєвою особливістю холодної прокатки є наявність наклепу, в результаті чого різко зростають межа міцності, границя текучості і зменшується відносне подовження. Так, наприклад, для сталі 0,8ПС межа плинності дорівнює 248 Н/мм<sup>2</sup>, а після прокатки з обтисненням 50% він збільшується до 725 Н/мм<sup>2</sup>. Експериментальні дослідження показали, що існує тісний зв'язок між межею плинності і відносним обтисненням, і дали апроксимуючі функції для визначення межі текучості різних марок сталей. Ці дані показують, що межа плинності інтенсивно росте в перших клітьх, в останніх клітьх інтенсивність росту значно знижується.

Холодна пластична деформація металу супроводжується значним виділенням тепла, тому температура штаби досягає 150-250°C. Аналіз численних експериментальних даних свідчить про необхідність врахування впливу температури металу на величину межі текучості. Облік впливу температури може бути здійснений за допомогою температурного коефіцієнта

$$\sigma_{\tau}^t = \sigma_{\tau} n_t \quad (1.2)$$

де  $\sigma_{\tau}^t$  - істинна межа плинності з урахуванням температури;  $n_t$  - температурний коефіцієнт.

Температурний коефіцієнт визначається за формулою

$$n_t = a + c(1,11 - 0,0044 \cdot t_n)^n \quad (1.3)$$

де  $t_n$  - температура металу перед вогнищем деформації,  $a$ ,  $c$ ,  $n$ , - коефіцієнти для певного виду мастила.

Складність врахування впливу температури на межу плинності обумовлюється необхідністю інформації про температуру металу в осередку деформації, яку в більшості випадків отримати дуже важко.

Прокатка на НСХП характеризується високими швидкостями деформації (від 1 до 103 с), що впливають на межу текучості. Однак це вплив незначний і їм зазвичай нехтують.

Отримання необхідної точності геометричних розмірів і форми листів на НСХП є найважливішим завданням, так як з підвищенням точності економиться метал і стабілізується робота агрегатів, що використовують холоднокатану штабу в якості заготовки.

Вплив різнотовщинності підкату необхідно розглядати з урахуванням зміни наклепу, сплющування валків і натягу. Зміна механічних властивостей при зміні обтиску в залежності від вихідної різнотовщинності істотно позначається на  $M_{п}$  і  $\partial P / \partial h_0$  особливо при прокатці ненаклепаної штаби з великим обтисненням. У міру збільшення попереднього обтиску штаби і зменшення обтиску за пропуск цей вплив зменшується. З ростом наклепу величина  $M_{п}$  збільшується, а коефіцієнт вирівнювання зменшується.

Різнотовщинність підкату викликає на НСХП порушення стійкості процесу і зміну міжклітьових натягів, що впливає на коефіцієнт вирівнювання. Зміна питомого натягу викликає додаткове зміна сили прокатки, що враховується в виразах  $\partial P / \partial h_1$  і  $\partial P / \partial h_0$  які в свою чергу є визначальними при знаходженні  $K_v$ . Крім цього, змінюється і  $M_{п}$ .

Натяг штаби істотно впливає на товщину штаби: зі збільшенням натягу товщина штаби зменшується. Задній натяг штаби робить значно більший вплив на вирівнювальну здатність стану. Цей вплив з'являється в залежності від жорсткості штаби  $M_{п}$  і коефіцієнта  $\sigma_k$ .

У загальному випадку коефіцієнт вирівнювання з ростом натягу зменшується, при цьому для більш тонких штаб інтенсивність зменшення  $K_{в\Sigma}$  значно більше.

Зменшення загального коефіцієнта вирівнювання стану ( $K_{в\Sigma}$ ) відбувається в основному за рахунок зростання коефіцієнта  $\sigma_k$  для середніх клітей, так як натяг штаби перед першою кліттю і після останньої кліті завжди менше натягу між клітями. Таким чином, для зменшення ПРР холоднокатаної штаби слід вести прокатку з невеликим натягом, особливо при прокатці тонких штаб. При стійкому процесі прокатки для забезпечення високої точності розмірів штаби по довжині доцільно підтримувати натяг в межах  $s = (0,2-0,4)$  ст.

Механічні властивості підкату по довжині штаби розподіляються нерівномірно. Поряд з неоднорідністю механічних властивостей через неоднорідність хімічного складу в слябах в гарячекатаних рулонах виникає додаткова неоднорідність через різних режимів охолодження решт і середини штаби. Кінці штаби охолоджуються швидше, в результаті межа міцності металу на початку і в кінці рулону вище, ніж в середині, на 10-18 %.

Зміни товщини і натягу штаби по фазі збігаються зі зміною зазору між валками через биття валків. Передавальний коефіцієнт від переміщення валків до зміни товщини зростає, так як  $Y_i$  більше 1, Вплив натягу більше позначається на передавальних коефіцієнтах клітей, що працюють з великими міжклітьовими натягами.

Відносна поздовжня різнотовщинність штаби при однаковому битті валків по клітям більше для штаб меншої товщини, незважаючи на велику жорсткість штаби. Частка поздовжньої різнотовщинності через биття валків зі зменшенням товщини штаб збільшується від останніх клітей до перших. Так, для штаб товщиною 0,5 мм биття валків в першій кліті надає домінуючий вплив на різнотовщинність (в 2-3 рази більше, ніж в інших клітях). Отже, при правильній комплектації валків по клітям стану в залежності від ексцентриситету валків можна зменшити подовжню

різновтовщинність через биття валків. При цьому слід комплектувати валки, орієнтуючись на прокатку тонких штаб, для яких вплив биття валків більш істотно.

Жорсткість кліті і штаби має суттєвий вплив на коефіцієнт вирівнювання. При холодній прокатки ставлення  $M_{п}/M_{к} = 2,0-2,2$  і ефективність збільшення жорсткості робочих клітей залежить від сортаменту стана, тобто величини жорсткості штаби. Так, при збільшенні жорсткості клітей НСХП 1680 в 1,5 рази відносна різновтовщинність підкату зменшується в 1,3–1,74 рази. Причому ефективність збільшення жорсткості перших клітей в 2–5 разів вище, ніж останніх. Це пояснюється збільшенням жорсткості штаби в міру зменшення її товщини, так як збільшується наклеп металу.

Збільшення числа клітей сприятливо позначається на точності штаби, так як зменшується обтиснення по клітям і підвищуються коефіцієнти вирівнювання для кожної кліті.

Швидкість прокатки впливає на поздовжню різновтовщинність через коефіцієнт тертя, межа плинності прокочується матеріалу і внаслідок зміни товщини масляної плівки ПЖТ.

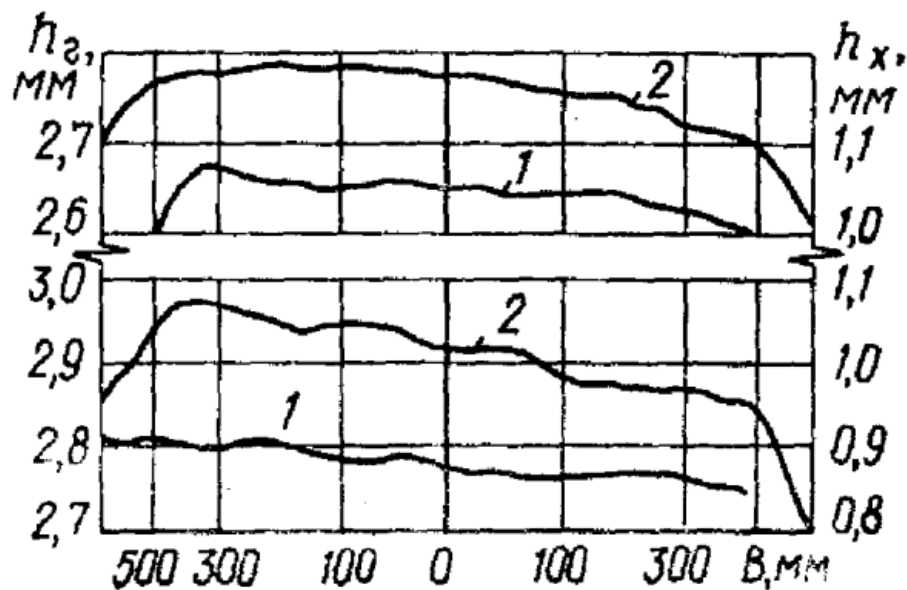
Практичні дослідження показали, що зі збільшенням швидкості прокатки до 5-7 м / с відбувається зниження коефіцієнта тертя з 0,15 до 0,06, а потім він залишається практично постійний. Зменшення коефіцієнта тертя призводить до зменшення сили прокатки і, отже, до зменшення товщини штаби.

Зі збільшенням швидкості прокатки підвищується температура металу внаслідок теплового ефекту пластичної деформації. Збільшення температури металу призводить до зниження межі текучості, і отже, до зменшення сили прокатки і товщини штаби.

Вплив ПЖТ може привести до збільшення або зменшення товщини штаби, поперечна різновтовщинність холодно-листової штаби визначається, прогином валків, теплової опуклістю, вихідної профіліровкою валків і зносом валків.

Як показують дослідження, поперечний профіль холодно-листової штаби якісно повторює профіль гарячекатаної штаби, зменшуючись за однакової кількості витяжок по ширині. На рис. 1.9 представлені профілі гарячекатаних і холоднокатаних штаб НСХП 1700. Поперечний профіль холоднокатаних штаб по формі подібний поперечним профілем підкату.

Отримання на НСХП поперечного профілю листа без різнотовщинності з різнотовщинного підкату призводить до виникнення внутрішнього натягу внаслідок нерівності витяжок по ширині і, як наслідок до утворення хвилястості або коробоватості. Вельми важливо, щоб поперечний профіль гарячекатаних штаб був стабільний від рулону до рулону, так як при зміні профілю штаби необхідно змінювати налаштування валків.



**Рисунок 1.9** - Профілографама холоднокатаних (1) і гарячекатаних (2) штаб різної товщини.

Площинність (неплощинність) холодно-листової штаби визначається за величиною відхилення від рівності і проявляється у вигляді хвилястості і коробоватості при наявності нерівності витяжок по ширині штаб. Між поперечним профілем і формою листа існує тісний взаємозв'язок.

Отримання необхідних механічних властивостей є найважливішим завданням прокатки, так як в значній мірі структура і штампуємість листової сталі визначаються режимом холодної прокатки. При малому ступені деформації, нижче критичної, зерна гарячекатаного металу майже не дробляться, і при подальшому відпалі зовсім не спостерігається зростання зерна, так як відсутній рекристалізація. При критичному ступені деформації (наприклад, 7-10% для сталі 08кп) при рекристалізації утворюються дуже великі зерна. Зі збільшенням ступеня деформації зерна фериту дробляться і витягуються в напрямку прокатки, відбувається розрив міжзеренних речовин, межі зерен майже зникають, цементит також витягується вздовж напрямку прокатки. При стисненні більше 50% структура стає полосчатою (текстурою), з подальшим збільшенням обтиснення межа плинності стає майже рівним межі міцності, область пластичної деформації зменшується, так як метал зміцнюється, і подальша прокатка стає скрутною (для вуглецевої сталі таке явище настає при  $\varepsilon = 95-97\%$ ).

Зі збільшенням ступеня деформації відбувається зростання меж плинності і міцності холоднокатаної відпаленої сталі. Найменша величина межі текучості відпаленої сталі виходить при стисненні 30-40%, що дає можливість знизити межу плинності і отримувати більш високу пластичність. Однак для такого режиму обтиску необхідний тонкий підкат, який на НШС гарячої прокатки отримати дуже важко. Тому при холодній прокатці на практиці сумарне обтиснення становить 50–80%, а отримання необхідних механічних властивостей забезпечують підбором оптимального хімічного складу сталі і режиму відпалу. Наприклад, можливе застосування проміжного відпалу після обтиску 50–55%, що дає можливість підвищити відносне подовження на 8-10%, знизити межу плинності 30-50 Н/мм<sup>2</sup> і твердість на 3-6 одиниць по Брінеллю. Крім того, в цьому випадку не обмежується максимальна товщина підкату, що прокочується на стані гарячої прокатки.



#### **1.4 Характеристика марки сталі**

Сталь 08 кп має наступний хімічний склад:

- 1 C – 0,05-0,12%
- 2 Mn – 0.25-0.50%
- 3 Si – 0.03%
- 4 S – 0.04%
- 5 P – 0.035%
- 6 Ni – 0.3%
- 7 Cu – 0.3%
- 8 Cr – 0.1%

#### **1.5 Пропозиції щодо вдосконалення виробництва холоднокатаного прокату на ПАТ «Запоріжсталь»**

На сучасному етапі розвитку прокатного виробництва основною тенденцією слід вважати освоєння і впровадження у виробництво принципово нової техніки і технології, що забезпечує поряд зі збільшенням обсягу виробництва - підвищення якості листової сталі. Зниження витрат на виробництво і економія енергетичних ресурсів є одними з найважливіших завдань в металургії, так як вона найбільш енергоємна галузь народного господарства. Проте досліджуючи вузькі місця цеху холодної прокатки та неперервний стан Тандем, ми виявили наступну проблему: при транспортуванні рулону з цеху тонкого листа до цеху холодної прокатки відбувається завальцювання кромки рулону (рис.1.10). Та при підготовці до травлення на НТА-4 відрізаються перші 5-8 витків рулону (близько 350-560 кг), через те, що вони пошкодилися при транспортуванні і зберіганні рулонів на складі.

Тому пропонується вдосконалення виробництва холоднокатаного прокату на НСХП 1680 ПАТ «Запоріжсталь» шляхом сортування металу за вмістом вуглецю та збільшення товщини підкату гарячекатаної штаби з 2,0

мм до 2,2 мм, що дозволить зменшити завальцювання рулонів штаби, зменшити енергосилові витрати при прокатуванні та кількість відбракованого металу.



а) гарячекатаний рулон;      б) гарячекатаний рулон з завальцюванням;      в) відходи після обрізу рулону.

**Рисунок 1.10** – Вигляд гарячекатаного рулону у нормальному стані і з завальцюванням

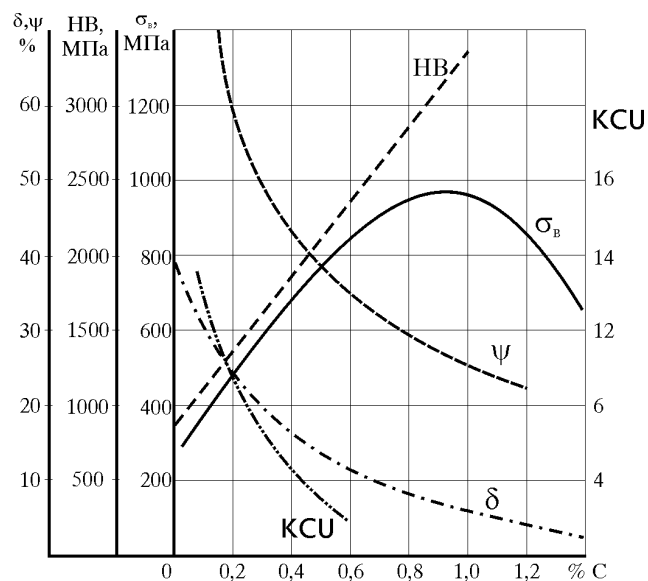
Також передбачається застосування сучасної комп'ютерної технології для розрахунку контактних напружень в осередку деформації, оптимізації продуктивності прокатного стана, проектування і розрахунку валків прокатних станів на міцність і деформацію. Зокрема буде використано програмний пакет MathCAD Prime 5, систему САПР AutoCAD Mechanical 2019 для виконання розрахунків і комп'ютерного моделювання.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Сталь, як один з головних конструкційних матеріалів сучасності не є двокомпонентним залізвуглецевим сплавом. Крім цих двох основних елементів сталі містять багато різних домішок, які можна поділити на постійні, випадкові та спеціальні. Всі ці елементи впливають на властивості сталі.

*Вуглець* є найважливішим елементом, який обумовлює структуру й властивості сталі, її поведінку при виробництві і експлуатації. Структура сталі після охолодження складається з фериту й цементиту. Чим більше буде в сталі вуглецю, тим більше буде цементиту, дуже твердої фази. Завдяки цьому твердість і міцність сталі підвищуються (рис. 2.1). Поряд з цим відносно видовження й звуження, а також ударна в'язкість зменшуються. Але в той же час, якщо простежити характер зміни границі міцності, можна побачити, що при концентрації більшій ніж 0,9 % С границя міцності починає знижуватися.

Це пояснюється особливостями структури заевтектоїдних сталей, де по межах зерен утворюється вторинний цементит у вигляді сітки, яка з підвищенням концентрації вуглецю стає безперервною. При випробуванні на розтяг цементит, як крихка фаза, полегшує руйнування.



НВ – твердість сталі,  $\sigma_b$  - границя міцності,  $\delta$  - пластичність, КСУ - ударна в'язкість

**Рисунок 2.1** - Вплив вмісту вуглецю на властивості сталі

Таким чином, за структурою розрізняють:

- *доевтектоїдну сталь*, що містить до 0,8% С, структура якої складається із фериту і перліту;
- *евтектоїдну*, що містить біля 0,8% С, структура якої складається тільки з перліту;
- *заевтектоїдну*, що містить 0,8 - 2,14% С, структура якої складається із зерен перліту, навколо яких розміщена сітка цементиту.

Аналіз структури сталей, що формується в умовах охолодження близьких до рівноваги, дає можливість зробити наступні висновки:

- загальною структурною складовою сталей є перліт (за винятком низьковуглецевих сталей);
- структурною складовою , що визначає заевтектоїдну сталь є наявність цементиту надлишкового (вторинного);
- структурною складовою , що визначає доевтектоїдну сталь є наявність надлишкового фериту.

Холодною обробкою тиском називають деформацію металу при температурах нижче температури рекристалізації, яка для чистих металів дорівнює або трохи вище  $(0,25...0,30) T_{пл}$ , де  $T_{пл}$  - абсолютна температура плавлення. Деформація металу в холодному стані супроводжується його зміцненням (наклепом), в результаті чого відбувається підвищення напруження плинину і, отже, опору металу деформації. Одночасно з цим знижуються пластичні властивості металу. При пластичній деформації полікристалічного тіла відбувається дроблення зерен і утворення текстури. Наявність текстури визначає відмінність механічних властивостей (анізотропію) вздовж і впоперек прокатоної штаби. Найбільш інтенсивно розвивається зміцнення при обтисках до 20-30 %. Ймовірно, в цьому інтервалі деформацій відбувається значна зміна структури кристалічних решіток, виникає найбільша кількість дефектів структури, що призводять до різкого зростання напруження плинину. Після отримання металом певного сумарного обтиснення міцність його, при одночасному зниженні пластичності, підвищується настільки, що виходячи з характеристик прокатного обладнання, подальша деформація металу виявляється не економічною або

неможливою. Величина сумарного обтиснення при холодному прокатуванні залежить від багатьох факторів, в тому числі від хімічного складу металу, що прокатується. Для маловуглецевої сталі величини сумарного обтиснення при прокатуванні на чотирьохкільбових станах становлять 60-70%. При цьому, чим більша міцність вихідного металу, тим менше величина сумарного допустимого обтиснення. Напруження плинину металу при холодному прокатуванні в певній мірі залежить від швидкості деформації і від температури деформації металу. Після прокатки метал піддають разупрочненню шляхом нагріву до температур 650°C (відпал в атмосфері захисного газу). Зі збільшенням вмісту вуглецю в вуглецевій сталі напруження плинину і твердість її істотно збільшується. Збільшення вмісту легуючих елементів в сталі сприяє збільшенню її твердості і, отже, напруження плинину. Найбільш помітний вплив марганцю (Mn) і кремнію (Si). Зміна в сталі будь-якого елемента викликає при інших рівних умовах зміну вуглецевого еквівалента і механічних властивостей.

В ЦХП-1 за місяць може надійти з ЦППТЛ близько 80 тис. тонн сталі 08кп, 08пс. З них 30 тис. тонн з вмістом вуглецю 0,05-0,06%.

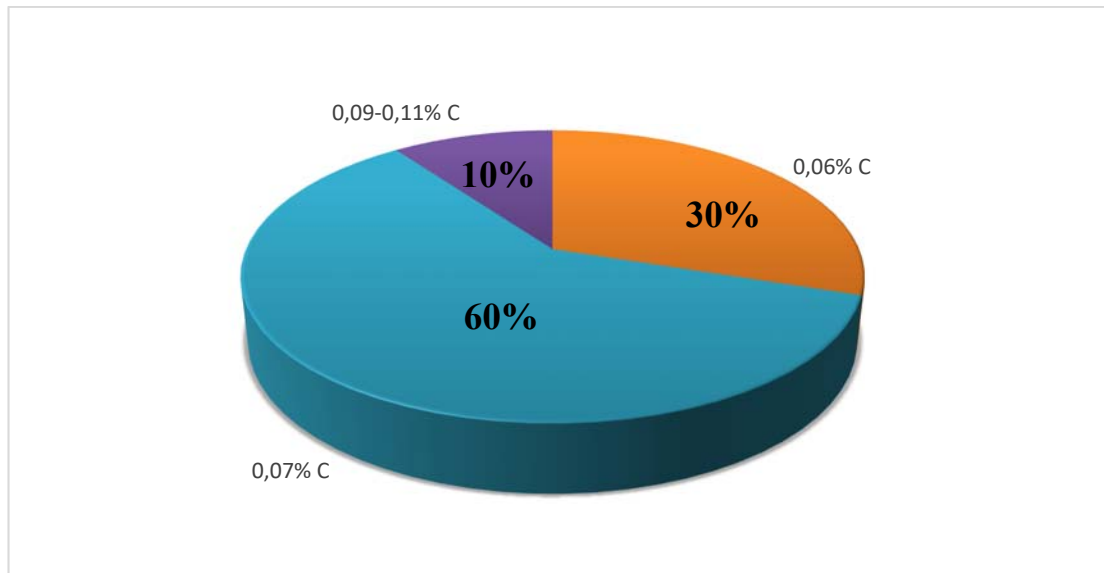
В цілому ЦППТЛ в місяць виробляє сталь розмірів 1025x2,0 мм в обсязі 70000 т з яких 13000-15000 т надходить до ЦХП-1 для виробництва холоднокатаної продукції. З них:

- 9000 т розкатують до товщини 0,5 мм;
- 2000 т розкатують до товщини 0,55 мм;
- 1000 т розкатують до товщини 0,6 мм.

Також варто відзначити, що відповідно до ГОСТу 16523 сталь 08кп можна прокатувати в ЦХП-1 при наявності в ній вуглецю від 0,05 до 0,12%, і сталь 08пс з вмістом вуглецю 0,05-0,11%.

За цими характеристиками було зроблено висновки та запропоновано одне з технічних рішень, а саме сортування сталі за вмістом вуглецю (рис. 2.2). За рис. 2.1 можна побачити, що сталь з низьким вмістом вуглецю більш пластична, ніж сталь з більш високим вмістом вуглецю. За рахунок цього фактору було запропоновано збільшити товщину підкату для НСХП 1680 ЦХП-1 з 2,0 мм до 2,2 мм; це дозволить поліпшити техніко-економічні показники виробництва, а

саме: зменшити кількість відбракування металу, зменшити витрати кислоти та електроенергії при травленні штаби на НТА-4, зменшити енергосилові витрати при прокатуванні штаби на ШСГП 1680 у ЦГПТЛ, підвищити якість продукції. Тобто пропонується сталь 08КП та 08ПС з вмістом вуглецю менше ніж 0,06% обтискати у ШСГП 1680 до 2,2 мм, а сталь з вмістом вуглецю більше 0,06% - до товщини 2,0 мм.

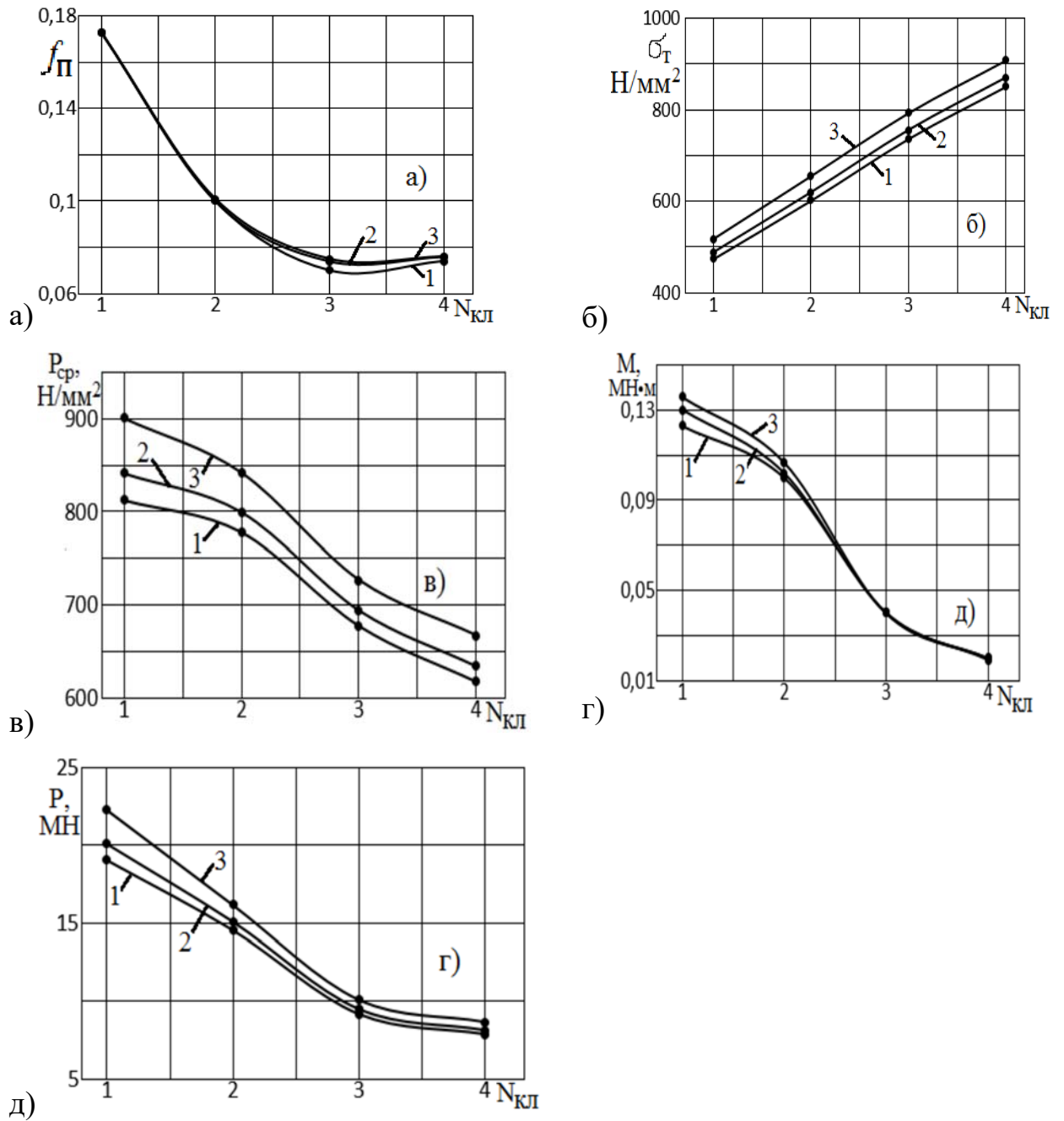


**Рисунок 2.2** - Сортування сталі за вмістом вуглецю

Використовуючи експериментальні дані [1] було виконано розрахунки і побудовано графіки енергосилових параметрів при холодному прокатуванні штаби зі сталі 08КП, наведені на рис. 2.3.

Запропонована технологія буде мати наступні переваги:

- 1) Покращення планшетності гарячекатаного підкату, і як наслідок, покращення планшетності холоднокатаного підкату;
- 2) Зниження кількості заворотів при транспортуванні та зберіганні, адже прокат більшої товщини менше схильний до деформування і отримання пошкоджень кромки, ніж тонкий прокат;
- 3) Збільшення продуктивності НТА-4 та ШСГП-1680 за рахунок збільшення товщини підкату.



1 – при вмісту вуглецю в сталі  $C = 0,06\%$ ; 2 – при вмісту вуглецю в сталі  $C = 0,08\%$ ; 3 – при вмісту вуглецю в сталі  $C = 0,12\%$ .

а – показник тертя  $f_{\Pi}$ ; б – напруження плинущого металу  $\sigma_{\Gamma}$ ; в – середнє нормальне контактне напруження  $P_{\text{ср}}$ ; г – момент прокатування  $M$ ; д – сила прокатування  $P$

**Рисунок 2.3** – Графіки розподілу по клітям енергосилових параметрів при холодному прокатуванні штаби  $0,7 \times 1030$  мм з підкату висотою  $H=2,2$  мм.

**Таблиця 2.1** – Економічні показники впровадження запропонованої технології прокатки штаб на ШСГП 1680 з подальшою прокаткою на стані «Тандем» при виробництві холоднокатаного прокату зі сталі марок 08кп / пс перетином 0,5-0,6x1000 мм в залежності від вмісту вуглецю в сталі

| Сортамент | Продуктивність ШСГП 1680, т/год | Продуктивність НТА-4, т/год | Надходження в ЦХП-1, за жовтень 2018, тонн | Маржинальний прибуток ЦГПТЛ на холоднокатаних рулонах за жовтень 2018, грн/тонн |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------|--|---|
| 2,0x1000  | 380                             | 119                         | 10806,7                                    | 2335,5  |
| 2,2x1000  | 390                             | 124                         |  |   |

Вищенаведені дані показують, що запропонована технологія має наступні переваги:

- вона не потребує великих матеріальних витрат і фінансових внесків;
- поліпшення якості гарячекатаних рулонів, які надходять з ЦГПТЛ до ЦХП-1 за рахунок збільшення товщини підкату (зниження кількості заворотів, поліпшення планшетності штаб, підвищення точності поперечного профілю штаб по товщині тощо);
- покращення показників роботи неперервного травильного агрегату НТА-4;
- зниження навантаження, а відповідно і витрата електроенергії при прокатуванні штаб на ШСГП 1680 в ЦГПТЛ;
- економія енергетичних ресурсів;
- економія фінансових коштів.



### **3 РОЗРАХУНОК НОРМАЛЬНИХ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПРОКАТУВАННІ ШТАБ**

*Вступ.* Теорія і практика холодної прокатки має багаторічну історію розвитку. Зусиллями багатьох дослідників знайдені теоретичні та емпіричні залежності між основними параметрами, які впливають на процес холодної прокатки і закладені в основу конструкцій створених станів холодної прокатки і тих, що проектуються. Ці залежності не були розраховані на використання комп'ютерної техніки, тому вони у більшій частині наведені у явному вигляді і у деяких випадках у вигляді номограм.

Наявність готових формул має свої позитивні сторони, але з використанням комп'ютерної техніки відкриваються більш широкі можливості дослідження і проведення розрахунково-теоретичної роботи. Інколи складність математичних виразів взагалі не дозволяє вирішити отримані рівняння. Цього можна уникнути при наявності підготовленої програми розрахунку чисельним методом на комп'ютері.

*Постановка задачі.* Метою роботи є розробка алгоритму і комп'ютерної програми розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації при холодному прокатуванні штаб на реверсивному стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь» за допомогою програмного комплексу Mathcad Prime 5. Іншою метою є порівняльний аналіз формул, що використовуються для розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації.

Застосування сучасної комп'ютерної програми обумовлює актуальність та практичну значимість даної статті як для навчального процесу, так і для науково-дослідної і проектно-конструкторської роботи.

Питанню розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації при прокатуванні штаб присвячено значну кількість робіт [3-10]

Розрахунок контактних нормальних напружень при прокатуванні тонких штаб може бути виконаний з використанням формул А.І. Целікова [4- 6]:

для зони відставання

$$p_x = \frac{K_0}{\delta} \left[ (\xi_0 \cdot \delta - 1) \cdot \left( \frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right]; \quad (3.1)$$

для зони випередження

$$p_x = \frac{K_1}{\delta} \left[ (\xi_1 \cdot \delta + 1) \cdot \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \quad (3.2)$$

де  $p_x$  - нормальне контактне напруження, МПа;

$h_0$  і  $h_1$  – початкова і кінцева товщина штаби, мм;

$h_x$  - товщина штаби у довільному перетині осередку деформації, мм;

$\xi_0$  і  $\xi_1$  і – коефіцієнти заднього і переднього натягання.

У цих рівняннях постійні коефіцієнти визначаються формулами:

$$\delta = \frac{2 \cdot f \cdot l_d}{\Delta h}; \quad \xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{K_0}; \quad \xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{K_1},$$

де  $\sigma_0$  і  $\sigma_1$  – переднє і заднє натягання, МПа;

$K_0$  і  $K_1$  – вимушені межі текучості до і після прокатки в МПа ( $K_0 = 1,15\sigma_{0,2}^0$ ;  $K_1 = 1,15\sigma_{0,2}^1$ );

$\sigma_{0,2}^0$  і  $\sigma_{0,2}^1$  – умовні межі текучості до і після прокатки, МПа;

$\Delta h$  – абсолютне обтиснення, мм;

$l_d$  – довжина осередку деформації, мм;

$f$  – коефіцієнт тертя.

Визначення загального тиску металу на валки за формулами (3.1-3.2) є найбільш точним, що підтверджено численними експериментами [4-6]. Однак використання цих формул з урахуванням закону зміни межі текучості в осередку деформації в залежності від обтиснення приводить до громіздких кінцевих формул, незручним для практичних розрахунків.

Приймаючи  $K = p_x$ , формули (3.1-3.2) спрощуються до вигляду [5,6]:

для зони відставання

$$p_x = \xi_0 K_0 \left( \frac{h_0}{h_x} \right)^{\delta-1}; \quad (3.3)$$

для зони випередження

$$p_x = \xi_1 K_1 \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^{\delta+1}. \quad (3.4)$$

Отримані формули виключно прості, однак недостатньо точно враховують зміну межі текучості в процесі деформування.

Для більш точного врахування зміни вимушеної межі текучості в осередку деформації від  $K_0$  до  $K_1$  отримано наступні рівняння, припускаючи, що зміна межі текучості відбувається по закону прямої лінії [5,6]:

для зони відставання

$$p_x = \left[ (K_0 - \sigma_0) + \frac{(K_1 - K_0)h_0}{\Delta h \cdot \delta} \right] \left( \frac{h_x}{h_0} \right)^{1-\delta} - \frac{(K_1 - K_0)h_x}{\Delta h \cdot \delta}; \quad (3.5)$$

для зони випередження

$$p_x = \left[ (K_1 - \sigma_1) - \frac{(K_1 - K_0)h_1}{\Delta h \cdot \delta} \right] \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^{1+\delta} + \frac{(K_1 - K_0)h_x}{\Delta h \cdot \delta}. \quad (3.6)$$

В дійсності зміна межі текучості в процесі деформації відбувається по параболічному закону. З урахування цього отримано наступні рівняння [5,6]:

для зони відставання

$$p_x = \left[ \xi_0 K_0 + 2 \frac{(K_1 - K_0)}{\Delta h^2} h_0 \left( \frac{h_0}{\delta+1} - \frac{h_1}{\delta} \right) \right] \left( \frac{h_x}{h_0} \right)^{1-\delta} - 2 \frac{(K_1 - K_0)}{\Delta h^2} h_x \left( \frac{h_x}{\delta+1} - \frac{h_1}{\delta} \right); \quad (3.7)$$

для зони випередження

$$p_x = \left[ \xi_1 K_1 - 2 \frac{h_1^2}{\delta(\delta-1)} \frac{(K_1 - K_0)}{\Delta h^2} \right] \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^{1+\delta} + 2 \frac{(K_1 - K_0)}{\Delta h^2} h_x \left( \frac{h_x}{\delta-1} - \frac{h_1}{\delta} \right). \quad (3.8)$$

З метою порівняння результатів розрахунку нормальних контактних напружень за усіма розглянутими чотирма формулами (3.1-3.2, 3.3-3.4, 3.5-3.6 і 3.7-3.8) відповідно до реальних режимів обтиснень на реверсивному стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь» було розроблено алгоритм і програму розрахунку у програмному комплексі Mathcad Prime 5 [11,12].

*Методика дослідження.* Для визначення величини тисків у довільному перетині осередку деформації розроблено алгоритм розрахунку, відображений на блок-схемі рис. 3.1. Схема стосується розрахунку за формулами (3.1-3.2); розрахунок за іншими формулами відбувається за аналогічною схемою.

Осередок деформації розбивається на ряд перетинів (від 0 до k). У кожному перетині визначається поточна висота штаби  $h$ , яка порівнюється з

висотою штаби у нейтральному перетині  $h_n$ . Висота  $h_n$  визначається з умови рівності тисків у цьому перетині з боку зони відставання і випередження. Так, наприклад, при розрахунку за формулами (3.1-3.2), для знаходження  $h_n$  вирішується рівняння:

$$\frac{K_0}{\delta} \left[ (\xi_0 \cdot \delta - 1) \cdot \left( \frac{h_0}{h_n} \right)^\delta + 1 \right] - \frac{K_1}{\delta} \left[ (\xi_1 \cdot \delta + 1) \cdot \left( \frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1 \right] = 0. \quad (3.9)$$

Аналогічно знаходиться  $h_n$  і при розрахунку за формулами (3.3-3.4, 3.5-3.6 і 3.7-3.8).

Змінюючи різні параметри (обтиснення, коефіцієнт тертя, діаметр валків, коефіцієнт заднього і переднього натягання) і розбиваючи осередок деформації на будь яку кількість ділянок, можна чисельно визначити вплив кожного з перерахованих факторів на розподіл нормальних контактних напружень.

Розрахунок виконували у програмному комплексі Mathcad Prime 5 відповідно до блок-схеми, наведеної на рис. 1. Осередок деформації розбивався на 20 перетинів (показники  $k$ ,  $i$ ) і у кожному перетині розраховувалися нормальні контактні напруження  $P_0$  – для зони відставання,  $P_1$  – для зони випередження.

У табл. 1 наведені параметри режимів прокатки сталі 08 кп на реверсивному стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь» (для прикладу наведено тільки 4 проходи із 11).

Програма і хід розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації у 20-тьох перетинах по формулам (3.1-3.2) для 1-го проходу прокатки на реверсивному стані 1680 у програмному комплексі Mathcad Prime 5 зображено на рис. 3.2.

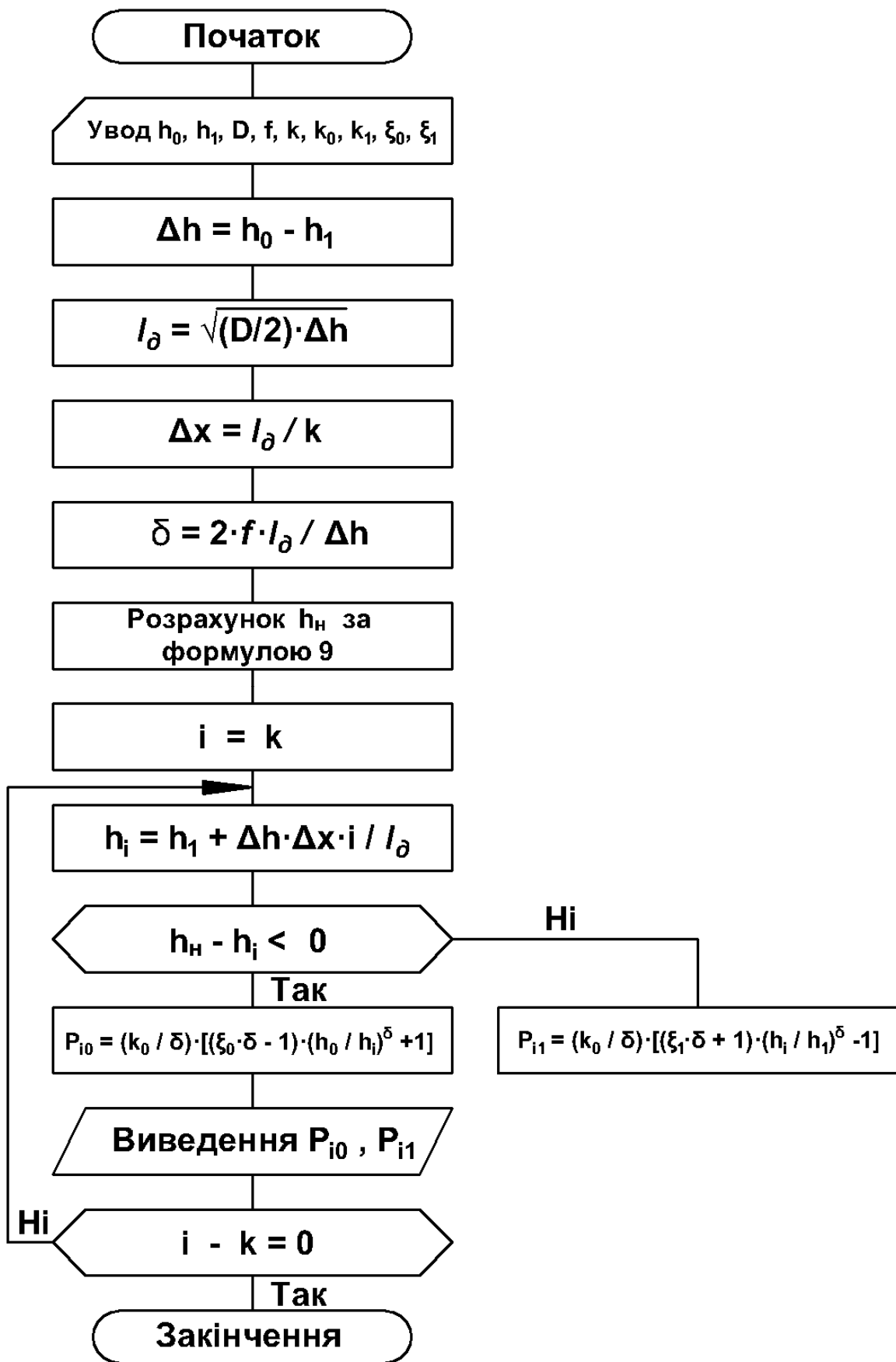


Рисунок 3.1 – Блок – схема розрахунку контактних напружень при поздовжньому прокатуванні штаб

**Таблиця 3.1** - Параметри режимів прокатки сталі 08 кп на реверсивному стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь»

| Найменування параметрів                                       | Номер проходу |        |       |        |
|---|---------------|--------|-------|--------|
|   | I             | II     | IV    | XI     |
| Товщина штаби, мм:  |               |        |       |        |
| вихідна $h_0$   | 3,05          | 2,45   | 1,95  | 0,9    |
| кінцева $h_1$   | 2,45          | 2,05   | 1,76  | 0,8    |
| Абсолютний обтиск $\Delta h$ , мм                             | 0,6           | 0,4    | 0,19  | 0,1    |
| Діаметр робочих валків $D$ , мм                               | 490           | 490    | 490   | 490    |
| Коефіцієнт зовнішнього тертя $f$                              | 0,1           | 0,1    | 0,1   | 0,1    |
| Відносна деформація $\varepsilon$ , %                         | 19,7          | 16,3   | 9,7   | 11,1   |
| Межа текучості, МПа:  |               |        |       |        |
| до прокатки $\sigma_0$  | 410           | 790    | 1040  | 1330   |
| після прокатки $\sigma_1$                                     | 790           | 990    | 1140  | 1340   |
| Вимушена межа текучості, МПа:                                 |               |        |       |        |
| до прокатки $k_0$   | 471,5         | 908,5  | 1196  | 1529,5 |
| після прокатки $k_1$  | 908,5         | 1138,5 | 1311  | 1541   |
| Коефіцієнт натягання:   |               |        |       |        |
| заднього $\xi_0$  | 1             | 0,98   | 0,988 | 0,985  |
| переднього $\xi_1$  | 0,98          | 0,97   | 0,976 | 0,979  |
| Коефіцієнт $\delta$   | 4,041         | 4,950  | 7,182 | 9,899  |
| Горизонтальна проекція $l_\delta$<br>довжини дуги захвату, мм | 12,12         | 9,90   | 6,82  | 4,95   |

*Результати досліджень та їх обговорення.* За отриманими розрахунковими даними будували епюри нормальних контактних напружень по довжині осередку деформації, зображені на рис. 3. Отримані епюри співпадають з епюрами, наведеними у літературі [4 - 6].

Площа епюри – це повний тиск металу на валки на одиницю ширини штаби, що прокатується. Площа епюр визначалася наступним чином. Усі криві рисунку 3 наносилися на один графік у Mathcad. Потім ці графіки перерисовувалися і визначалася площа епюр у програмному комплексі AutoCAD Mechanical 2019.

Порівняння площ епюр нормальних контактних напружень, отриманих за спрощеними формулами (3.3-3.4) і більш точними рівняннями А.І. Целікова (3.1-3.2) показує, що ці площі майже повністю співпадають: максимальна їх різниця складає не більше 5 %. Отже спрощені формули є рівноцінними по точності визначення величини нормального контактного напруження.

Прохід № 1  $j := 0$

$s := \text{READEXCEL}(\text{".\Исходные данные 2.xlsx"}, \text{"Лист2!A1:D14"})$

$h_0 := (s^{(j)})_0$      $h_1 := (s^{(j)})_1$      $\Delta h := (s^{(j)})_2$      $D := (s^{(j)})_3$      $f := (s^{(j)})_4$      $\varepsilon := (s^{(j)})_5$      $\sigma_{s0} := (s^{(j)})_6$

$\sigma_{s1} := (s^{(j)})_7$      $k_0 := (s^{(j)})_8$      $k_1 := (s^{(j)})_9$      $\xi_0 := (s^{(j)})_{10}$      $\xi_1 := (s^{(j)})_{11}$      $\delta := (s^{(j)})_{12}$      $l_\delta := (s^{(j)})_{13}$

$\sigma_0 := k_0 \cdot (1 - \xi_0)$      $\sigma_1 := k_1 \cdot (1 - \xi_1)$      $k := 20$      $\Delta x := \frac{l_\delta}{k} = 0.606$

$h_\pi := 2.5$

$$\frac{k_0}{\delta} \cdot \left( (\xi_0 \cdot \delta - 1) \cdot \left( \frac{h_0}{h_\pi} \right)^\delta + 1 \right) - \frac{k_1}{\delta} \cdot \left( (\xi_1 \cdot \delta + 1) \cdot \left( \frac{h_\pi}{h_1} \right)^\delta - 1 \right) = 0$$

$h_\pi := \text{find}(h_\pi) = 2.477$

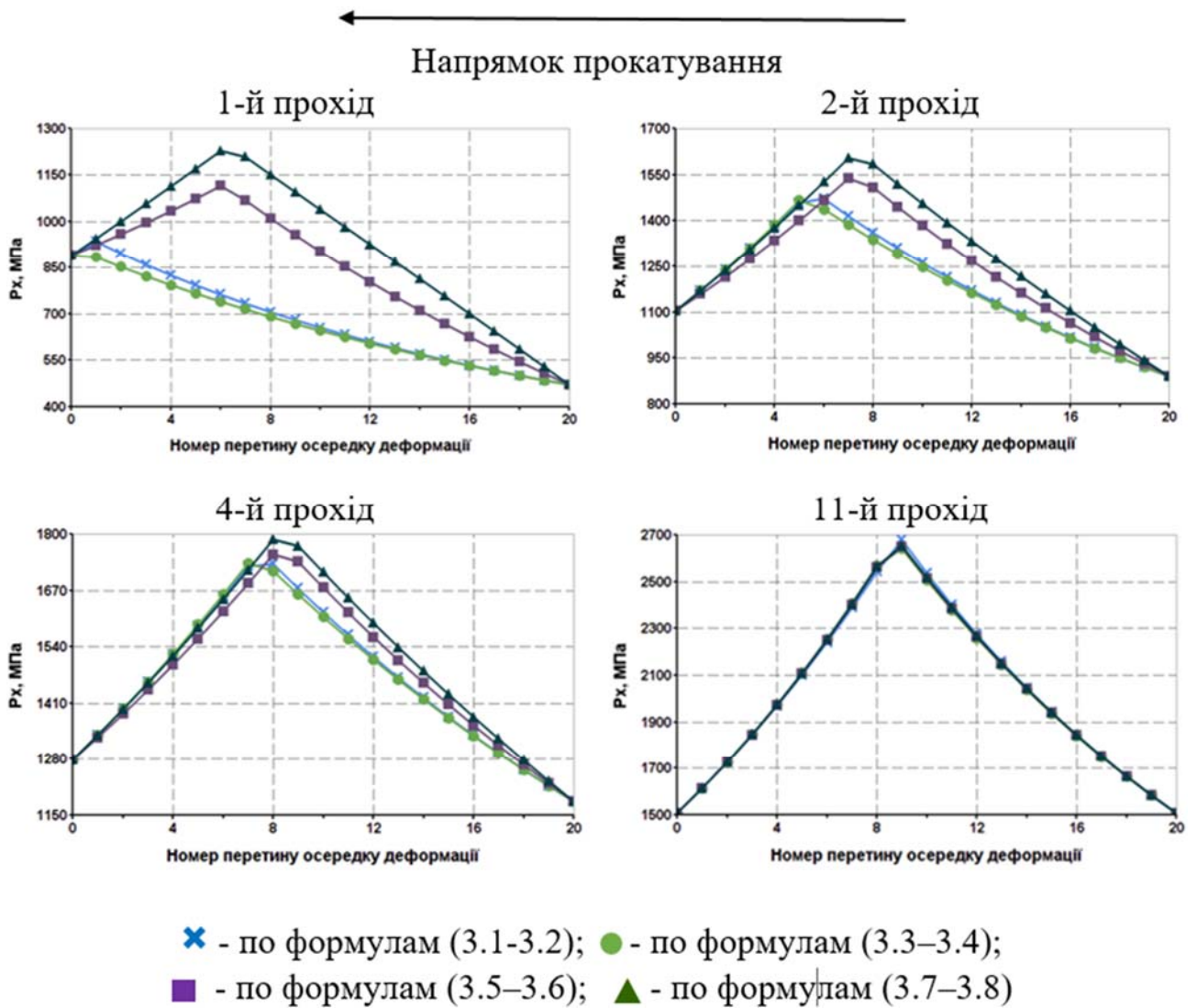
$$P_o := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..20 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} h_i \leftarrow h_1 + \frac{\Delta h}{l_\delta} \cdot \Delta x \cdot i \\ \text{if } h_\pi - h_i \leq 0 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} P_{0i} \leftarrow \frac{k_0}{\delta} \cdot \left( (\xi_0 \cdot \delta - 1) \cdot \left( \frac{h_0}{h_i} \right)^\delta + 1 \right) \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} P_{1i} \leftarrow \frac{k_1}{\delta} \cdot \left( (\xi_1 \cdot \delta + 1) \cdot \left( \frac{h_i}{h_1} \right)^\delta - 1 \right) \end{array} \right. \\ \text{stack}(P_1, \text{submatrix}(P_0, 1, 20, 0, 0)) \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right\| = \begin{array}{l} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 20 \end{array} \begin{bmatrix} 890.33 \\ 935.399 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$\max(P_o) = 935.399$

$$i := 0..20 = \begin{array}{l} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 20 \end{array} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}$$

**Рисунок 3.2** – Програма розрахунку нормального контактного напруження в осередку деформації у 20-х перетинах по формулам (3.1-3.2) для 1-го проходу прокатки на стані 1680 у програмному комплексі Mathcad

У той же час прийняте при виводі диференціального рівняння рівноваги спрощення приведе до порівняно простих формул при врахуванні зміни вимушеної межі текучості як за законом прямої, так і за параболічним законом.



**Рисунок 3.3** – Епюри нормальних контактних напружень в проходах реверсивного прокатного стана 1680

**Таблиця 3.2** – Площі епюр нормальних контактних напружень відповідно до рис. 3.3

| Прохід | Площа епюр мм <sup>2</sup> , отриманих за формулами: |          |          |          | Відносна різниця площ епюр у %, отриманих за формулами: |       |       |       |
|--------|--|----------|----------|----------|---|-------|-------|-------|
|        | 1-2  | 3-4      | 5-6      | 7-8      | 1-2   | 3-4   | 5-6   | 7-8   |
| I      | 2346,58  | 2258,55  | 3020,81  | 3361,73  | 0,00  | -3,75 | 28,73 | 43,26 |
| II     | 6629,30  | 6587,51  | 6998,25  | 7333,96  | 0,00  | -0,63 | 5,57  | 10,63 |
| IV     | 8871,83  | 8829,35  | 8956,23  | 9143,63  | 0,00  | -0,48 | 0,95  | 3,06  |
| XI     | 13548,88   | 13487,09 | 13566,52 | 13572,98 | 0,00  | -0,46 | 0,13  | 0,18  |



З наведених епюр видно (табл. 3.2), що максимальна різниця їх площ за прямолінійним законом зміни вимушеної межі текучості в осередку деформації досягає 29 %, а за параболічним 43 %, особливо в перших проходах, коли метал інтенсивно зміцнюється.

На основі аналізу епюр контактних напружень можна зробити висновок, що найбільш точний розрахунок загального тиску металу на валки при холодному прокатуванні можливий лише у тому випадку, коли формули, що застосовуються, враховують зміну вимушеної межі текучості в осередку деформації за прямолінійним або параболічним законами. При цьому прямолінійний закон зміни вимушеної межі текучості може бути використаний при невеликих обтисненнях. В інших випадках слід використовувати формули, що враховують зміну вимушеної межі текучості за параболічним законом.

## 4 ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СТАНІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

### 4.1 Постановка задачі дослідження

Значне розширення виробництва і необхідність підвищення якості тонколистового холоднокатаного металу вимагають удосконалення існуючих і створення нових високопродуктивних та економічних широкоштабових станів холодної прокатки.

Найважливішими параметрами широкоштабового стана холодної прокатки є швидкість прокатки, маса рулонів, що прокатуються а також рівень механізації та автоматизації процесу прокатки.

Продуктивність і економічність прокатного стана підвищується разом з підвищенням швидкості прокатки і маси рулонів тільки до деякої межі. Подальше підвищення цих параметрів, забезпечуючи деяке зростання продуктивності стана, робить його експлуатацію неекономічною, оскільки темпи зростання капітальних і експлуатаційних витрат випереджають темпи зростання продуктивності стана.

У зв'язку з цим при проектуванні нового обладнання велике значення має економічний аналіз технічних параметрів, що приймаються, для станів, що створюються і визначення економічних меж їх підвищення.

Тип прокатного стана і схема технологічного процесу, як правило, визначаються сортаментом і заданою продуктивністю, а швидкість прокатки і масу рулону вибирають звичайно на основі прикидочних розрахунків. Потім за допомогою економічного розрахунку визначають ефективність вибраних вихідних даних. Цей звичайний шлях вибору, незважаючи на накопичений досвід, часто буває недостатньо об'єктивним, оскільки не може врахувати складної залежності і взаємодії усіх параметрів прокатного стана і процесу прокатки. Тому обрані дані не завжди забезпечують отримання максимально можливої продуктивності і найкращих техніко-економічних показників роботи обладнання.

Метою даного розділу є виявлення доцільних меж підвищення швидкості і маси рулонів штаби, що проектується, виявлення залежності продуктивності стана від цих найважливіших параметрів з урахуванням інших істотних факторів: динамічних характеристик привода, кількості зварних швів, часу допоміжних і заправочних операцій, режиму прокатки, частоти змін валків тощо. Наступний економічний аналіз знайденої залежності дозволить зробити обґрунтовані висновки щодо доцільних меж підвищення швидкості прокатки і маси рулонів.

Іншою метою є розробка програми для виконання розрахунків за відомою методикою [13] із застосуванням сучасного програмного комплексу MathCAD Prime 5 [14].

Пошук оптимальних параметрів прокатного стана обґрунтований тим, що він дозволяє встановити на які максимальні швидкості прокатки доцільно розробляти нові засоби автоматизації, змазки, системи охолодження тощо, вибирати найбільш ефективні технологічні параметри обладнання з оптимальними техніко-економічними показниками.

Середньогодинна розрахункова продуктивність стана може бути визначена за формулою [13]:

$$Q_{cp} = \frac{3600 \cdot q}{c_1 \cdot \frac{q}{v_{пр}} + c_2 \cdot (1+k) \cdot v_{пр} + (c_3 + c_4 \cdot k) \cdot \frac{1}{v_{пр}} + c_5 + k \cdot c_6 + q \cdot c_7}, \quad (4.1)$$

де  $q$  – маса рулону, т;  $v_{пр}$  – швидкість прокатки, що встановилася, м/с;  $c_1 - c_7$  – коефіцієнти, які визначаються за наступними формулами.

$$c_1 = \frac{1}{\rho_{п} \cdot b \cdot h_k}, \text{ м/т}; \quad (4.2)$$

де  $\rho_{п}$  – щільність металу штаби, т/м<sup>3</sup>;  $b$  – ширина штаби, м;  $h_k$  – кінцева товщина штаби, мм.

$$c_2 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right), \text{ с/м}^2; \quad (4.3)$$

де  $a_p$  – прискорення при розгоні головного привода стана, м/с<sup>2</sup>;  $a_T$  – сповільнення при гальмуванні головного привода стана, м/с<sup>2</sup>.

$$c_3 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_3^2 - l_{3.c}, \text{ м}; \quad (4.4)$$

де  $v_3$  – заправочна швидкість, м/с;  $l_{3.c}$  – довжина штаби, прокатоної на заправочній швидкості на початку і у кінці циклу, м.

$$c_4 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_{\Pi}^2 - l_{\text{уст.п}}, \text{ м}; \quad (4.5)$$

де  $v_{\Pi}$  – понижена швидкість прокатки при проходженні зварного шва, м/с;  $l_{\text{уст.п}}$  – довжина штаби, прокатоної на зниженої швидкості, що встановилася,  $v_{\Pi}$  при проходженні зварного шва через усі робочі кліті, м.

$$c_5 = t_{3.0} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_3, \text{ с}; \quad (4.6)$$

де  $t_{3.0}$  – час неперекриваємих допоміжних і заправочних операцій (включаючи прокатку переднього і заднього кінців на заправочній швидкості), с.

$$c_6 = \frac{l_{\text{уст.п}}}{v_{\Pi}} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_{\Pi}, \text{ с}; \quad (4.7)$$

$$c_7 = \frac{3600 \cdot t_{\text{п.в}}}{Q_{\text{п.в}}}, \text{ год/т}; \quad (4.8)$$

де  $t_{\text{п.в}}$  – норма часу на перевалку стана, год.;  $Q_{\text{п.в}}$  – планова норма металу, що прокатується між двома перевалками, т.

Враховуючи, що

$$l_{3.c} \gg \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_3^2 \quad \text{і} \quad t_{3.0} \gg \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_3,$$

можна практично прийняти:

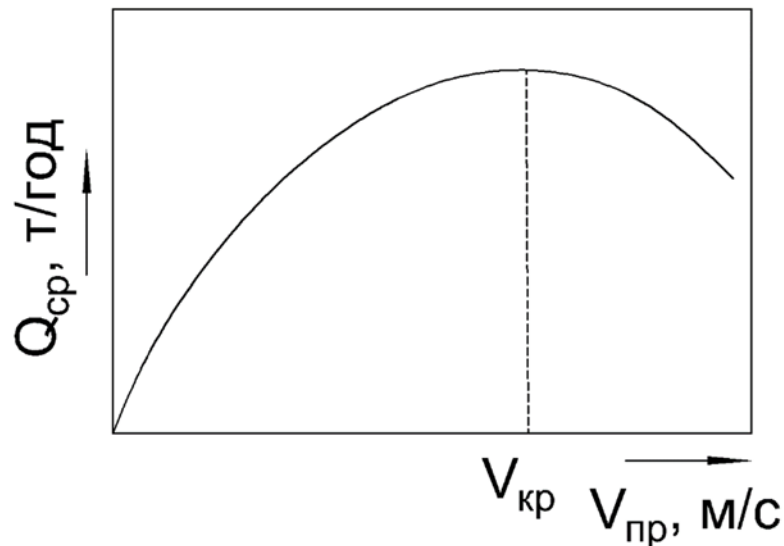
$$c_3 = -l_{3.c} \quad \text{і} \quad c_5 = t_{3.0}.$$

$$\text{Кількість зварних швів в рулоні: } k = \frac{q}{q_1} - 1,$$

де  $q_1$  – маса гарячекатаного рулону перед зваркою, т.

Рівняння (4.1) є загальним для усіх багатоклітьових станів холодної прокатки. Воно встановлює безпосередній аналітичний зв'язок між розрахунковою середньою часовою продуктивністю, з одного боку, і швидкістю прокатки і масою рулону, з іншого боку, враховуючи при цьому інші, найбільш суттєві фактори. Аналіз рівняння (4.1) показує, що при

постійній масі рулону  $q$  крива  $Q_{\text{ср}} = f(v_{\text{пр}})$  має наступний характер (рис. 4.1): спочатку вона доволі різко підвищується, потім зростання уповільнюється, при деякому значенні  $v_{\text{пр}}$  крива має максимум, а потім починає зменшуватися. Таким чином, підвищення швидкості прокатки призводить до зростання продуктивності тільки до відомої межі.



**Рисунок 4.1** – Характер кривої  $Q_{\text{ср}} = f(v_{\text{пр}})$  при постійній масі рулону ( $q = \text{const}$ )

Швидкість прокатки, при якій продуктивність максимальна, умовно називається критичною швидкістю прокатки  $v_{\text{кр}}$ . Величина  $v_{\text{кр}}$  залежить від коефіцієнтів  $c_1 - c_7$ , що визначаються параметрами кожної групи станів (товщина і ширина прокату, норми перевалок, стан циклу прокатки тощо). Дослідження впливу основних параметрів стана і технологічного процесу прокатки на величину  $Q_{\text{ср}}$  і  $v_{\text{кр}}$  наведено нижче. Однак не слід вважати, що неперервні стани повинні проектуватися на швидкість прокатки, яка дорівнює  $v_{\text{кр}}$ . При збільшенні швидкості прокатки і наближенні її до  $v_{\text{кр}}$  ефективність витрат, пов'язаних з підвищенням швидкості прокатки неухильно знижується, оскільки на кожен одиницю приросту швидкості забезпечується усе менший приріст продуктивності стана.

Непропорційність між швидкістю прокатки і продуктивністю пояснюється тим, що при більш високих швидкостях усе більша частина часу

циклу прокатки кожного рулону повинна витрачатися на розгони і гальмування і усе менша – на прокатку при швидкості, що встановилася.

Швидкість  $v_{кр}$  відповідає такому циклу, у якому час прокатки на швидкості, що встановилася,  $t_{уст}$  дорівнює нулю (після розгону негайно починається гальмування). Подальше підвищення швидкості взагалі позбавлено сенсу, оскільки стан не буде встигати гальмуватися до заправочної швидкості при випуску кінців рулону. Тому перша частина кривої на рис. 4.1 при  $v_{пр} > v_{кр}$  має лише теоретичний характер, який пояснюється структурою рівняння (4.1) і на практиці реалізована бути не може. Але навіть при  $v_{пр} = v_{кр}$  максимальна проектна швидкість практично не буде використана, оскільки майже увесь цикл прокатки буде складатися з розгонів і гальмувань.

Отже, остаточну відповідь на питання про те, на яку швидкість прокатки потрібно проектувати новий або реконструювати діючий стан, може дати тільки економічний розрахунок. Зрештою нас цікавить економічно доцільна межа швидкостей прокатки, визначити яку потрібно за спеціальною методикою [13].

Слід відмітити, що непропорційність між продуктивністю і швидкістю прокатки неминуча при рулонному способі виробництва, який за самою схемою переривчастий і пов'язаний з постійними розгонами, гальмуваннями і зупинками стана. Тому необхідно вести розробку нових, неперервних процесів холодної прокатки, які не пов'язані з розмотуванням і змотуванням штаби у рулони.

## 4.2 Залежність продуктивності прокатного стану від швидкості прокатки при різній масі рулонів штаби, що прокатується

Розглянемо залежність продуктивності прокатного стану від швидкості прокатки на прикладі чотирикільцевого стану 1700 для прокатки маловуглецевих сталей і автолиста (аналог стану 1680 ПАТ «Запоріжсталь»). При визначенні вихідних параметрів і режимів обтиснень використовуємо практичні дані заводу ММК ім. Ілліча (м. Маріуполь), на якому встановлений цей стан.

Розрахунок проводимо в програмному комплексі Mathcad Prime 5.

За основний профілерозмір приймаємо штабу товщиною  $h_k := 0.8$  мм, шириною  $b := 1.28$  м, що прокатується з підкату товщиною  $h_0 := 2.75$  мм.

Параметри стану і режими обтиснень:

$$h_1 := 1.85 \text{ мм}; h_2 := 1.2 \text{ мм}; h_3 := 0.9 \text{ мм}; \rho_n := 7.85 \text{ т/м}^3; l_{p1} := 7 \text{ м};$$

$$l_{12} := 4 \text{ м}; l_{23} := 4 \text{ м}; l_{34} := 4 \text{ м}; l_{4M} := 3.9 \text{ м}.$$

З урахуванням наведених вище даних приймаємо наступні значення вихідних параметрів:

$$a_p := 2.35 \text{ м/с}^2; a_T := 2.8 \text{ м/с}^2; v_n := 10 \text{ м/с}; l_{3.c1} := 7 \text{ м}; t_{3.o} := 60 \text{ с};$$

$$q_1 := 5 \text{ т}; t_{n.e1} := 0.2 \text{ год}; n := 4; Q_{n.e} := 2000 \text{ т}.$$

Вплив маси рулона на продуктивність стану досліджуємо в діапазоні 5-40 тонн з кроком 5 тонн. Таким чином  $q$  дорівнює:

Далі визначаємо коефіцієнти  $c1-c7$ .

$$q := 0, 5..40 = \begin{bmatrix} 0 \\ 5 \\ 10 \\ 15 \\ 20 \\ 25 \\ 30 \\ 35 \\ 40 \end{bmatrix} \text{ т}.$$

$$c_1 := \frac{1}{\rho_n \cdot b \cdot h_k \cdot 10^{-3}} = 124 \text{ м/т}; \quad c_2 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) = 0.39 \text{ с2/м};$$

$$c_3 := - \left( l_{3.c1} + l_{p1} \cdot \frac{h_0}{h_k} + l_{12} \cdot \frac{h_1}{h_k} + l_{23} \cdot \frac{h_2}{h_k} + l_{34} \cdot \frac{h_3}{h_k} + l_{AM} \right) = -54.7 \text{ м};$$

$$l_{3.c2} := l_{p1} \cdot \frac{h_0}{h_k} + l_{12} \cdot \frac{h_1}{h_k} + l_{23} \cdot \frac{h_2}{h_k} + l_{34} \cdot \frac{h_3}{h_k} + l_{AM} = 47.7 \text{ м};$$

$$l_{ycm.n} := l_{3.c2} - l_{p1} \cdot \frac{h_0}{h_k} - l_{AM} = 19.8 \text{ м}; \quad c_4 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n^2 - l_{ycm.n} = 19.4 \text{ м};$$

$$c_5 := t_{3.o} = 60 \text{ с}; \quad c_6 := \frac{l_{ycm.n}}{v_n} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n = -5.9 \text{ с};$$

$$c_7 := \frac{3600 \cdot t_{n.e1} \cdot n}{Q_{n.e}} = 1.4 \text{ год/т}.$$

Таким чином, для чотирикільцевого стана 1700 остаточно отримаємо середньогодинну розрахункову продуктивність:

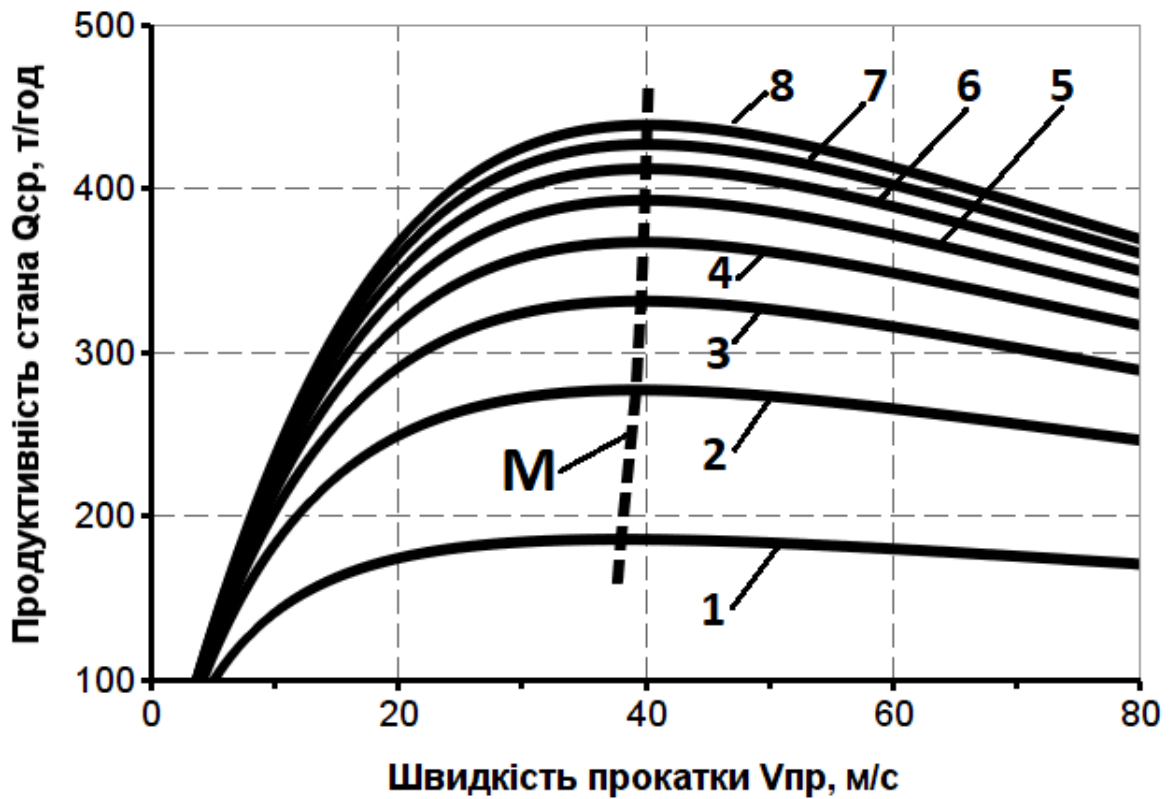
$$Q_{cp}(q, v_{np}) := \frac{3600 \cdot q}{c_1 \cdot \frac{q}{v_{np}} + c_2 \cdot (1+k) \cdot v_{np} + (c_3 + c_4 \cdot k) \cdot \frac{1}{v_{np}} + c_5 + k \cdot c_6 + q \cdot c_7}.$$

Або після спрощення, з урахуванням того, що  $k := \frac{q}{q_1} - 1$  :

$$Q_{cp}(q, v_{np}) := \frac{3600 \cdot q}{0.27 \cdot q + \frac{128.28 \cdot q - 74.1}{v_{np}} + 0.078 \cdot v_{np} \cdot q + 65.85}.$$

Будуємо графіки залежностей, рис. 4.2, і за допомогою функції **maximize** ( $Q_{cp}$ ,  $v_{np}$ ) Mathcad Prime 5, знаходимо максимуми кривих 1-8, тобто  $v_{кр}$  для кожної кривої, будуємо криву **M** на рис. 4.2 і результати заносимо до табл. 4.1.





1 – 5 т; 2 – 10 т; 3 – 15 т; 4 – 20 т; 5 – 25 т; 6 – 30 т; 7 – 35 т; 8 – 40 т;

M – максимум продуктивності стана

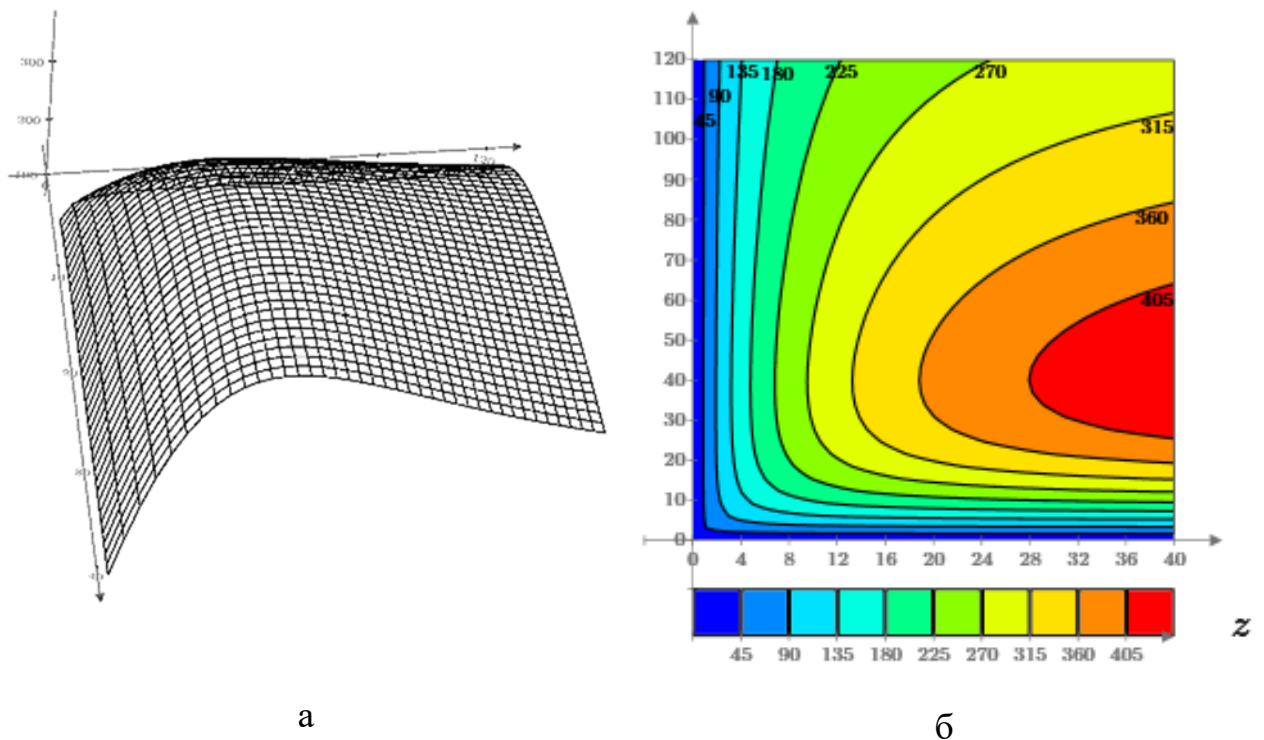
**Рисунок 4.2** – Зміна середньогодинної продуктивності чотирикільцевого стана 1700 в залежності від швидкості прокатки при різних масі рулонів

**Таблиця 4.1** – Залежність критичної швидкості прокатки  $v_{кр}$ , при якій продуктивність стана максимальна, від маси рулону, що прокатується

| Маса рулону, т                                    | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    | 35    | 40    |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Критичною швидкістю прокатки $v_{кр}$ , м/с       | 38,07 | 39,30 | 39,70 | 39,90 | 40,01 | 40,09 | 40,15 | 40,19 |
| Максимальна продуктивність стана $Q_{ср}$ , т/ГОД | 185,6 | 276,8 | 331,1 | 367,1 | 392,7 | 411,9 | 426,8 | 438,6 |

З графіків на рис. 4.2 видно, що величина  $v_{кр}$  знаходиться у межах 38 – 40 м/с. Слід зазначити, що визначення середньої продуктивності необхідно виконувати з урахуванням завантаження двигунів головного приводу робочих клітей по моменту, оскільки може статися так, що вибраний привід не в змозі забезпечити прокатку штаб усіх профілерозмірів, що розглядаються, з максимальною швидкістю.

На рис. 4.3 наведено тривимірні графіки залежності середньогодинної продуктивності чотириклітьового стана 1700 в залежності від швидкості прокатки і маси рулонів, побудовані відповідно до рис. 4.2.



а – графік поверхні; б – графік ліній рівня (контурний графік)

**Рисунок 4.3** – Тривимірні графіки залежності середньогодинної продуктивності стана 1700 в залежності від швидкості прокатки і маси рулонів

### 4.3 Вплив темпів розгону і гальмування двигунів на продуктивність прокатного стана

В літературі [13] наведено діапазони змінення деяких основних параметрів. Розглянемо, як змінюється середньогодинна продуктивність стана в залежності від змінення вихідних параметрів у вказаних діапазонах.

Аналіз виконаємо на прикладі чотирикільцевого стана 1700 ММК ім. Ілліча, м. Маріуполь (аналога стана 1680 ПАТ «Запоріжсталь»), при прокатуванні на ньому штаби основного профілерозміру 0,8×1280 мм з подкату товщиною 2,75 мм. Параметри стана і режими обтиснень такі ж самі, як у підрозділі 4.2.

Вплив темпів розгону і гальмування двигунів дослідимо у діапазонах:  $a_p = 1 \div 2,8 \text{ м/с}^2$ ;  $a_T = 1,19 \div 3,34 \text{ м/с}^2$ , враховуючи, що  $q = 25 \text{ т}$ ;  $q_1 = 5 \text{ т}$ ;  $v_n = 10 \text{ м/с}$ ;  $t_{3.0} = 60 \text{ с}$ ;  $l_{3.c} = 54 \text{ м}$ ;  $l_{yсм.n} = 19 \text{ м}$ ;  $t_{п.в} = 0,8 \text{ ч}$ ;  $Q_{п.в} = 2000 \text{ т}$ .

Розрахунок проводимо в програмному комплексі Mathcad Prime 5.

$$t_{3.0} := 60 \text{ с}; \quad q_1 := 5 \text{ т}; \quad Q_{n.в} := 2000 \text{ т}; \quad q := 25 \text{ т}; \quad v_n := 10 \text{ м/с};$$

$$l_{3.c} := 54.7 \text{ м}; \quad l_{yсм.n} := 19.8 \text{ м}; \quad t_{n.в} := 0.8 \text{ год}; \quad \rho_n := 7.85 \text{ т/м}^3;$$

$$k := \frac{q}{q_1} - 1 = 4; \quad a_p := \begin{bmatrix} 1 \\ 1.67 \\ 2.35 \\ 2.8 \end{bmatrix} \text{ м/с}^2; \quad a_T := \begin{bmatrix} 1.19 \\ 2 \\ 2.8 \\ 3.34 \end{bmatrix} \text{ м/с}^2.$$

$$c_1 := \frac{1}{\rho_n \cdot b \cdot h_k \cdot 10^{-3}} = 124 \text{ м/т}; \quad c_3 := -l_{3.c} = -54.7 \text{ м};$$

$$c_2 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) = \begin{bmatrix} 0.92 \\ 0.549 \\ 0.391 \\ 0.328 \end{bmatrix} \text{ c2/м;}$$

$$c_4 := c_2 \cdot v_n^2 - l_{ycm.n} = \begin{bmatrix} 72.217 \\ 35.14 \\ 19.334 \\ 13.027 \end{bmatrix} \text{ м;}$$

$$c_6 := \frac{l_{ycm.n}}{v_n} - 2 \cdot c_2 \cdot v_n = \begin{bmatrix} -16.423 \\ -9.008 \\ -5.847 \\ -4.585 \end{bmatrix} \text{ с;}$$

$$c_5 := t_{3.0} = 60 \text{ с;}$$

$$c_7 := \frac{3600 \cdot t_{n.в}}{Q_{n.в}} = 1.4 \text{ год/т.}$$

Після підстановки значень у формулу (4.1) отримаємо формулу:

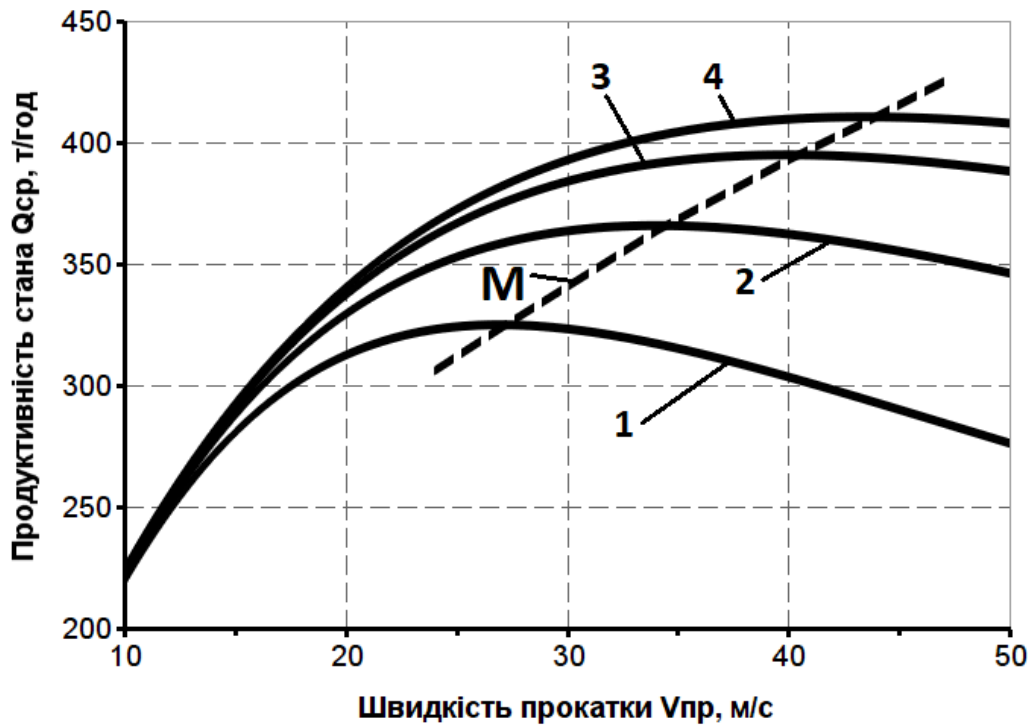
$$Q_{cp}(v_{np}) := \frac{90000}{\frac{2966.1 + 400 \cdot c_2}{v_{np}} + 5 \cdot c_2 \cdot v_{np} + 102.92 - 80 \cdot c_2} .$$

Слід зазначити, що остання формула, отримана в Mathcad Prime 5, дещо відрізняється від формули (40), що наведена у літературі [13], оскільки формула (40) має похибку.

Будуємо графіки залежностей продуктивності стана  $Q_{cp}$  від швидкості прокатки  $v_{np}$  при різних темпах розгону ( $a_p$ ) і гальмування ( $a_T$ ), рис. 4.4.

За допомогою функції **maximize** ( $Q_{cp}$ ,  $v_{np}$ ) Mathcad Prime 5, знаходимо максимуми кривих 1-4 на рис. 4.4, тобто  $v_{кр}$  для кожної кривої, будуємо криву **M** на рис. 4.4 і результати заносимо до табл. 4.2.

З рис. 4.4 слідує, що в заданому діапазоні змінення темпів розгону і гальмування величина  $v_{кр}$  змінюється від 27 до 44 м/с, а середньогодинна продуктивність збільшується на 20 %. Отже, проектування двигунів головного приводу станів з більш високими значеннями  $a_p$  і  $a_T$  вельми вигідно: воно дозволяє підвищити продуктивність і одночасно підвищити межі швидкостей прокатки.



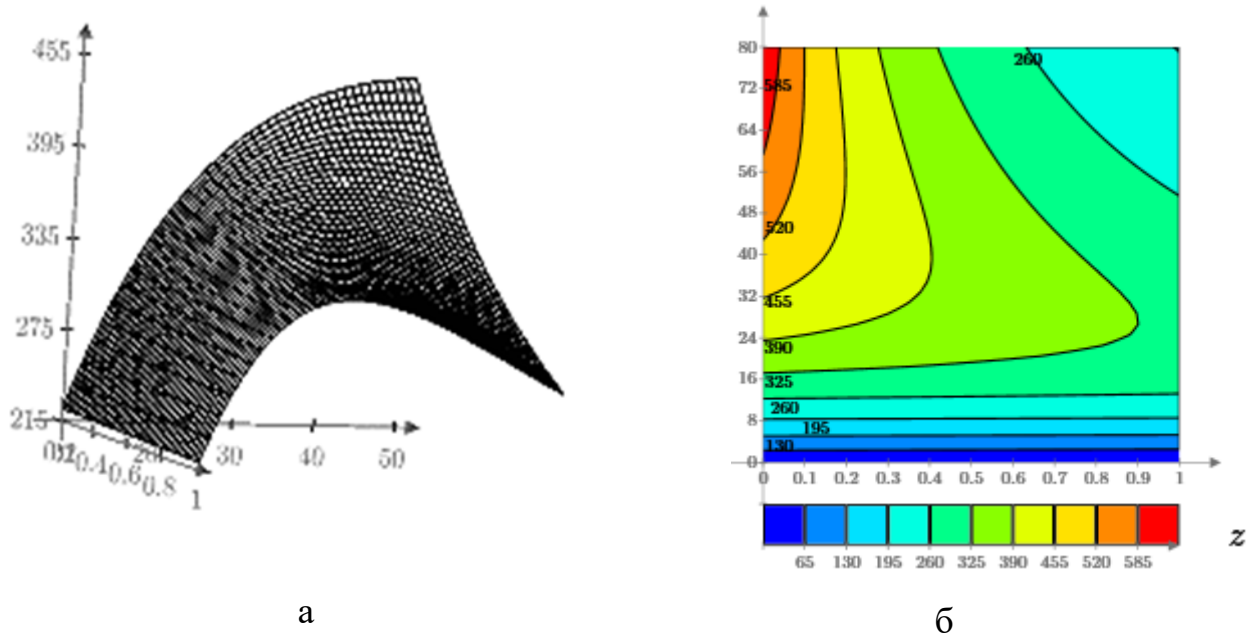
1 –  $a_p=1 \text{ м/с}^2$ ,  $a_T=1,19 \text{ м/с}^2$ ; 2 –  $a_p=1,67 \text{ м/с}^2$ ,  $a_T=2,0 \text{ м/с}^2$ ; 3 –  $a_p=2,35 \text{ м/с}^2$ ,  $a_T=2,8 \text{ м/с}^2$ ; 4 –  $a_p=2,8 \text{ м/с}^2$ ,  $a_T=3,34 \text{ м/с}^2$ ; М – максимум продуктивності стана

**Рисунок 4.4** – Зміна середньогодинної продуктивності чотирикільтового стана 1700 в залежності від швидкості прокатки при різних темпах розгону ( $a_p$ ) і гальмування ( $a_T$ )

**Таблиця 4.2** – Залежність критичної швидкості прокатки  $v_{кр}$ , при якій продуктивність стана максимальна, від темпів розгону ( $a_p$ ) і гальмування ( $a_T$ )

| Прискорення при розгоні головного приводу стана $a_p$ , $\text{м/с}^2$ | Сповільнення при гальмуванні головного приводу стана $a_T$ , $\text{м/с}^2$ | Критичною швидкістю прокатки $v_{кр}$ , $\text{м/с}$ | Максимальна продуктивність стана $Q_{ср}$ , $\text{т/год}$ |
|--|---|--|--|
| 1,0  | 1,19  | 26,98  | 323,50   |
| 1,67   | 2,0   | 34,13  | 364,14   |
| 2,35   | 2,8   | 40,04  | 393,06   |
| 2,8  | 3,34  | 43,54  | 408,61   |

На рис. 4.5 наведено тривимірні графіки залежності середньогодинної продуктивності чотирьохкільцевого стана 1700 в залежності від швидкості прокатки і темпів розгону і гальмування, побудовані відповідно до рис. 4.4.



а – графік поверхні; б – графік ліній рівня (контурний графік)

**Рисунок 4.5** – Тривимірні графіки залежності продуктивності стана в залежності від швидкості прокатки і темпів розгону і гальмування

#### 4.4 Вплив величини зниженої швидкості прокатки при проходженні зварних швів на продуктивність прокатного стана

Вплив величини зниженої швидкості прокатки при проходженні зварних швів дослідимо у діапазоні змінення величини  $v_{п} = 2 \div 15$  м/с, хоча по відомим даним, ця швидкість не перевищує 10 м/с. Вихідні параметри приймаємо наступними:  $a_p = 2,35$  м/с<sup>2</sup>;  $a_T = 2,8$  м/с<sup>2</sup>,  $q = 25$  т;  $q_1 = 5$  т;  $t_{з.о} = 60$  с;  $l_{з.с} = 54$  м;  $l_{уст.н} = 19$  м;  $t_{п.в} = 0,8$  ч;  $Q_{п.в} = 2000$  т.

Розрахунок проводимо в програмному комплексі Mathcad Prime 5.

$$a_p := 2.35 \text{ м/с}^2; \quad a_T := 2.8 \text{ м/с}^2; \quad q := 25 \text{ т}; \quad l_{3.c} := 54.7 \text{ м}; \quad t_{3.0} := 60 \text{ с};$$

$$q_1 := 5 \text{ т}; \quad t_{n.8} := 0.8 \text{ год}; \quad l_{yсм.n} := 19.8 \text{ м}; \quad Q_{n.8} := 2000 \text{ т};$$

$$k := \frac{q}{q_1} - 1 = 4; \quad \rho_n := 7.85 \text{ .}$$

Вплив величини зниженої швидкості прокатки на продуктивність стана при проходженні зварних швів дослідимо у діапазоні змінення величини  $V_p = 2 \div 15$  м/с. Таким чином  $V_p$  дорівнює:  
Далі визначаємо коефіцієнти  $c_1$ - $c_7$ .

$$v_n := \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \\ 6 \\ 8 \\ 10 \\ 15 \end{bmatrix} \text{ м/с};$$

$$c_1 := \frac{1}{\rho_n \cdot b \cdot h_k \cdot 10^{-3}} = 124 \text{ м/т}; \quad c_2 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) = 0.39 \text{ с}^2/\text{м};$$

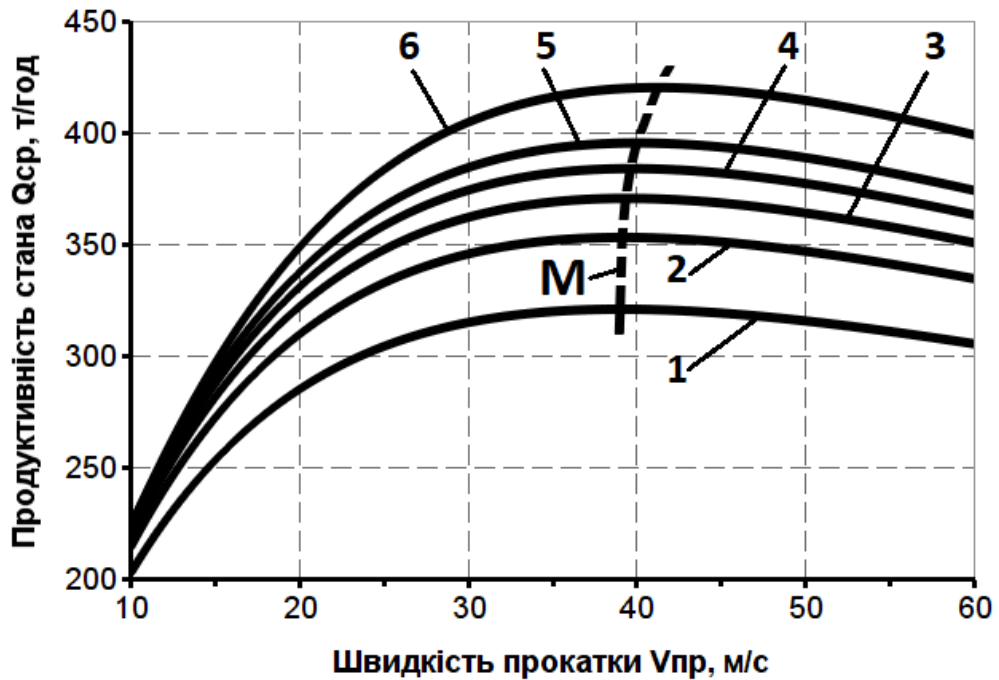
$$c_3 := -l_{3.c} = -54.7 \text{ м}; \quad c_4 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n^2 - l_{yсм.n} \text{ м};$$

$$c_5 := t_{3.0} = 60 \text{ с}; \quad c_6 := \frac{l_{yсм.n}}{v_n} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n \text{ с};$$

$$c_7 := \frac{3600 \cdot t_{n.8}}{Q_{n.8}} = 1.4 \text{ год/т.} \quad \text{Після підстановки значень у формулу (4.1) і спрощення виразу отримаємо:}$$

$$Q_{cp}(v_n, v_{np}) := \frac{90000}{\frac{2966.1 + 1.57 \cdot v_n^2}{v_{np}} + 1.95 \cdot v_{np} + \frac{79.2}{v_n} - 3.13 \cdot v_n + 95}$$

Будуємо графіки залежностей продуктивності стана  $Q_{cp}$  від швидкості прокатки  $v_{np}$  при різних величинах швидкості прокатки при проходженні зварних швів  $v_n$ , рис. 4.6.



1 -  $v_{п} = 2$  м/с, 2 -  $v_{п} = 4$  м/с, 3 -  $v_{п} = 6$  м/с, 4 -  $v_{п} = 8$  м/с, 5 -  $v_{п} = 10$  м/с, 6 -  $v_{п} = 15$  м/с ; M – максимум продуктивності стана

**Рисунок 4.6** – Зміна середньогодинної продуктивності чотирикільтового стана 1700 в залежності від швидкості прокатки при різних величинах швидкості прокатки при проходженні зварних швів  $v_{п}$

За допомогою функції **maximize** ( $Q_{ср}$ ,  $v_{пр}$ ) Mathcad Prime 5, знаходимо максимуми кривих 1-6 на рис. 4.6, тобто  $v_{кр}$  для кожної кривої, будуюмо криву M на рис. 4.6 і результати заносимо до табл. 4.3.

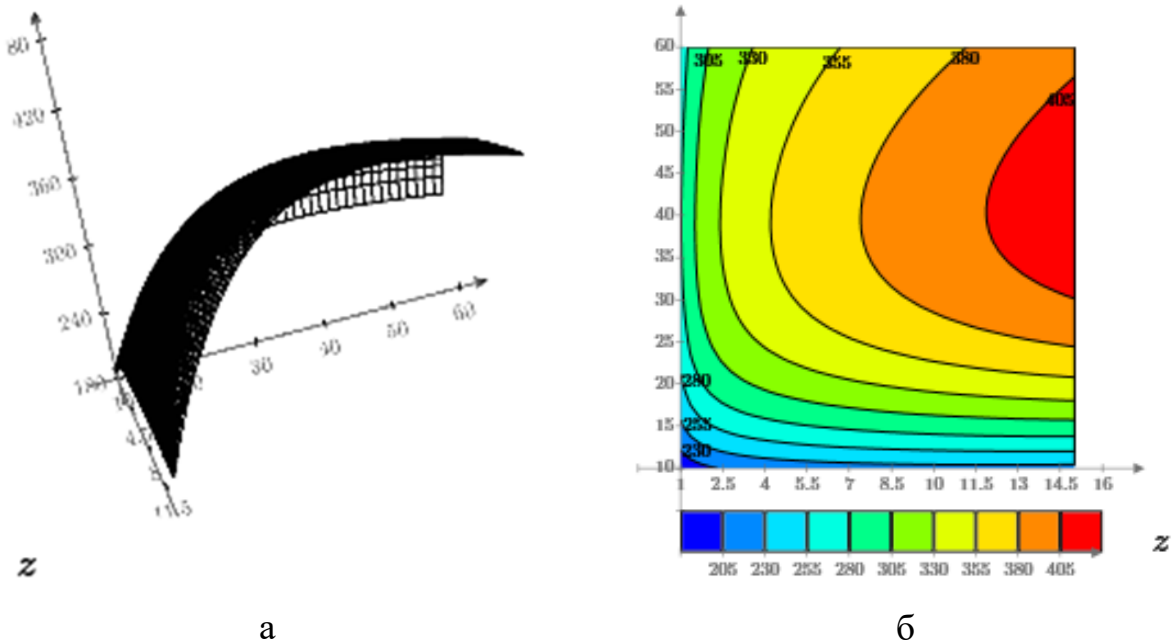
Розгляд рис. 4.6 показує, що підвищення швидкості прокатки при проходженні зварних швів  $v_{п}$  є досить ефективним засобом підвищення продуктивності прокатного стана: при зміні  $v_{п}$  від 2 до 15 м/с продуктивність стана зростає на 25 – 30 %. Однак величина  $v_{кр}$  при цьому практично не змінюється: усі максимуми кривих  $Q_{ср}$  відповідають швидкості прокатки 39 - 41 м/с.

На рис. 4.7 наведено тривимірні графіки залежності середньогодинної продуктивності чотирикільтового стана 1700 в залежності від швидкості прокатки і швидкості прокатки при проходженні зварних швів  $v_{п}$ , побудовані відповідно до рис. 4.6.



**Таблиця 4.3** – Залежність критичної швидкості прокатки  $v_{кр}$ , при якій продуктивність стана максимальна, від швидкості прокатки при проходженні зварних швів

|   |       |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Швидкість прокатки при проходженні зварних швів $v_{п}$ , м/с | 2     | 4     | 6     | 8     | 10    | 15    |
| Критичною швидкістю прокатки $v_{кр}$ , м/с                   | 39,04 | 39,17 | 39,37 | 39,66 | 40,02 | 41,26 |
| Максимальна продуктивність стана $Q_{ср}$ , т/ГОД             | 320,7 | 352,9 | 370,4 | 383,8 | 395,3 | 420,1 |



а – графік поверхні; б – графік ліній рівня (контурний графік)

**Рисунок 4.7** – Тривимірні графіки залежності продуктивності стана в залежності від швидкості прокатки і швидкості прокатки при проходженні зварних швів

#### 4.5 Вплив часу допоміжних і заправочних операцій на середньогодинну продуктивність прокатного стану

Дослідимо вплив на середньогодинну продуктивність прокатного стану допоміжних і заправочних операцій в діапазоні зміни  $t_{3.0}=40 - 140$  сек при наступних параметрах:  $q = 30$  т;  $q_1 = 5$  т;  $v_n = 10$  м/с;  $a_p = a_T = 1,67$  м/с<sup>2</sup> (найбільш часто реалізуємі темпи на стані 1700);  $l_{3.c} = 54$  м;  $l_{ycm.n} = 19$  м;  $t_{п.в} = 0,8$  ч;  $Q_{п.в} = 2000$  т. Розрахунок проводимо в програмному комплексі Mathcad Prime 5.

$$a_p := 1.67 \text{ м/с}^2; \quad a_T := 1.67 \text{ м/с}^2; \quad q := 30 \text{ т}; \quad l_{3.c} := 54.7 \text{ м}; \quad v_n := 10 \text{ м/с};$$

$$q_1 := 5 \text{ т}; \quad t_{н.в} := 0.8 \text{ год}; \quad l_{ycm.n} := 19.8 \text{ м}; \quad Q_{п.в} := 2000 \text{ т};$$

$$k := \frac{q}{q_1} - 1 = 5; \quad \rho_n := 7.85 \text{ .}$$

Вплив часу допоміжних і заправочних операцій на продуктивність стану досліджуємо у діапазоні змінення величини  $t_{3.0} = 40 \div 140$  сек. Таким чином  $t_{3.0}$  дорівнює:  
Далі визначаємо коефіцієнти  $c_1$ - $c_7$ .

$$t_{3.0} := \begin{bmatrix} 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \\ 120 \\ 140 \end{bmatrix} \text{ с};$$

$$c_1 := \frac{1}{\rho_n \cdot b \cdot h_k \cdot 10^{-3}} = 124 \text{ м/т}; \quad c_2 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) = 0.6 \text{ с}^2/\text{м};$$

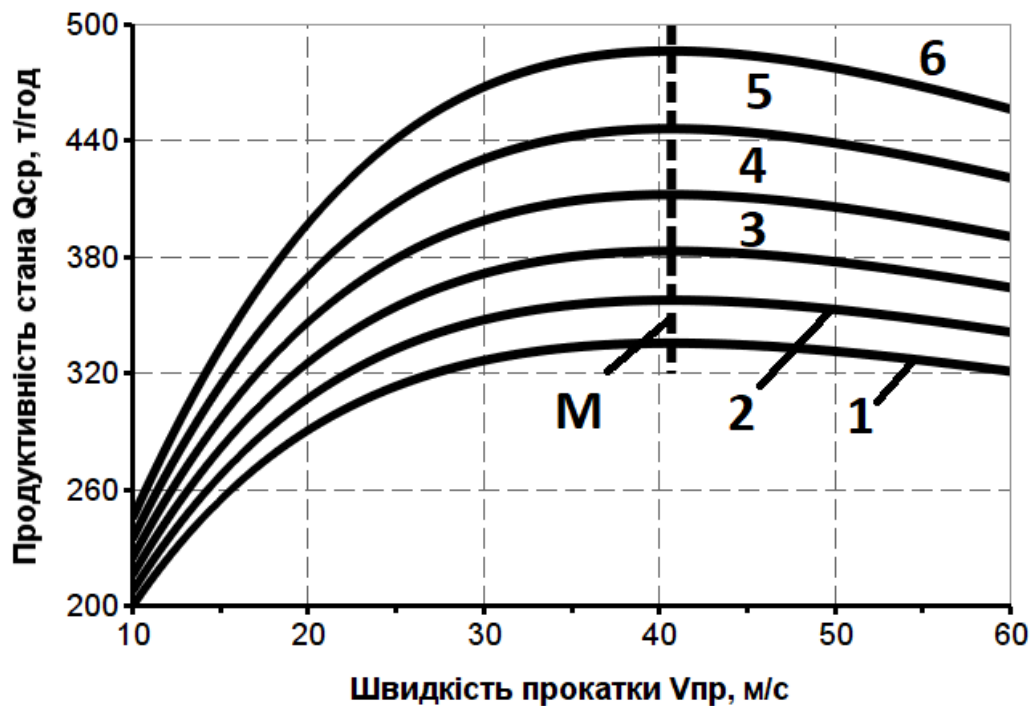
$$c_3 := -l_{3.c} = -54.7 \text{ м}; \quad c_4 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n^2 - l_{ycm.n} = 40.1 \text{ м};$$

$$c_5 := t_{3.0} \quad c_6 := \frac{l_{ycm.n}}{v_n} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n = -10 \text{ с};$$

$$c_7 := \frac{3600 \cdot t_{н.в}}{Q_{п.в}} = 1.4 \text{ год/т}. \quad \text{Після підстановки значень у формулу (4.1) і спрощення виразу отримаємо:}$$

$$Q_{cp}(t_{3.0}, v_{np}) := \frac{108000}{2.34 \cdot v_{np} + t_{3.0} + \frac{3865.8}{v_{np}} - 8.0}$$

Будуємо графіки залежностей продуктивності стана  $Q_{\text{ср}}$  від швидкості прокатки  $v_{\text{пр}}$  при різних величинах часу допоміжних і заправочних операцій  $t_{\text{з.о.}}$ , рис. 4.8.



1 -  $t_{\text{з.о.}} = 140$  с, 2 -  $t_{\text{з.о.}} = 120$  с, 3 -  $t_{\text{з.о.}} = 100$  с, 4 -  $t_{\text{з.о.}} = 80$  с, 5 -  $t_{\text{з.о.}} = 60$  с, 6 -  $t_{\text{з.о.}} = 40$  с; М – максимум продуктивності стана

**Рисунок 4.8** – Зміна середньогодинної продуктивності чотириклітьового стана 1700 в залежності від швидкості прокатки при різних величинах часу допоміжних і заправочних операцій  $t_{\text{з.о.}}$ .

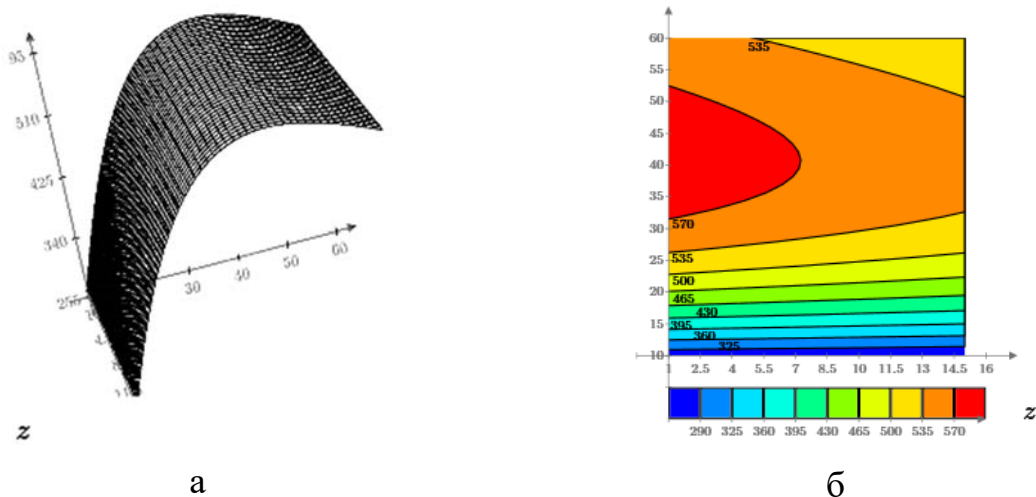
За допомогою функції **maximize** ( $Q_{\text{ср}}$ ,  $v_{\text{пр}}$ ) Mathcad Prime 5, знаходимо максимуми кривих 1-6 на рис. 4.8, тобто  $t_{\text{з.о.}}$  для кожної кривої, будуємо криву М на рис. 4.8 і результати заносимо до табл. 4.4.

**Таблиця 4.4** – Залежність критичної швидкості прокатки  $v_{кр}$ , при якій продуктивність стана максимальна, від величини часу допоміжних і заправочних операцій

|  |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Час допоміжних і заправочних операцій $t_{з.о.}$ , сек | 40    | 60    | 80    | 100   | 120   | 140   |
| Критичною швидкістю прокатки $v_{кр}$ , м/с            | 40,65 | 40,65 | 40,65 | 40,65 | 40,65 | 40,65 |
| Максимальна продуктивність стана $Q_{ср}$ , т/ГОД      | 486,0 | 445,9 | 411,9 | 382,7 | 357,4 | 335,2 |

Результати розрахунків, наведених на рис. 4.7 показують, що скорочення часу допоміжних і заправочних операцій приводить до підвищення продуктивності стана, але не впливає на величину  $v_{кр}$ , яка при значеннях, що практично реалізуються  $a_p$  і  $a_t$  виявляється доволі низькою – 40 м/с.

На рис. 4.9 наведено тривимірні графіки залежності середньогодинної продуктивності чотирикільцевого стана 1700 в залежності від швидкості прокатки і часу допоміжних і заправочних операцій  $t_{з.о.}$ , побудовані відповідно до рис. 4.8.



а – графік поверхні; б – графік ліній рівня (контурний графік)

**Рисунок 4.9** – Тривимірні графіки залежності продуктивності стана в залежності від швидкості прокатки і часу допоміжних і заправочних операцій

#### 4.6 Вплив маси гарячекатаного рулону на середньогодинну продуктивність прокатного стана

Важливе значення має залежність продуктивності стана від маси гарячекатаного рулону перед зваркою і кількості зварних швів в холоднокатаному рулоні, що визначається нею (величини  $k$ ).

Усі наведені вище розрахунки і графіки виконано при умові  $q_1 = 5$  т, що відповідає максимальному значенню цієї величини для діючих цехів вітчизняних заводів. Дослідимо зміну  $Q_{cp}$  при збільшенні  $q_1$  від 5 до 15 т, враховуючи, що загальна маса рулону дорівнює 25 т. Решту параметрів приймаємо, як і раніше:  $v_{п} = 10$  м/с;  $a_p = 2,35$  м/с<sup>2</sup>;  $a_T = 2,8$  м/с<sup>2</sup>;  $l_{3.c} = 54$  м;  $l_{yct.n} = 19$  м;  $t_{п.в} = 0,8$  ч;  $Q_{п.в} = 2000$  т. Розрахунок проводимо в програмному комплексі Mathcad Prime 5. Для розрахунку використовуємо формулу, отриману у розділі 4.2.

$$a_p := 2.35 \text{ м/с}^2; a_T := 2.8 \text{ м/с}^2; v_n := 10 \text{ м/с}; l_{3.c} := 54.7 \text{ м}; q := 25 \text{ т.}$$

$$l_{yct.n} := 19.8 \text{ м}; t_{n.в} := 0.8 \text{ год}; \rho_n := 7.85; t_{3.0} := 60 \text{ с}; Q_{n.в} := 2000 \text{ т.}$$

Вплив маси гарячекатаного рулону на продуктивність стана досліджуємо в діапазоні 5-15. Таким чином  $q$  дорівнює: Далі визначаємо коефіцієнти  $c_1$ - $c_7$ .

$$q_1 := \begin{bmatrix} 5 \\ 7.5 \\ 10 \\ 15 \end{bmatrix} \text{ т.}$$

$$c_1 := \frac{1}{\rho_n \cdot b \cdot h_k \cdot 10^{-3}} = 124 \text{ м/т}; \quad c_2 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) = 0.39 \text{ с2/м};$$

$$c_3 := -l_{3.c} = -54.7 \text{ м}; \quad c_4 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n^2 - l_{ycm.n} = 19.3 \text{ м};$$

$$c_5 := t_{3.0} = 60 \text{ с}; \quad c_6 := \frac{l_{ycm.n}}{v_n} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n = -5.8 \text{ с};$$

$$c_7 := \frac{3600 \cdot t_{n.в}}{Q_{n.в}} = 1.4 \text{ год/т}; \quad k := \frac{q}{q_1} - 1.$$

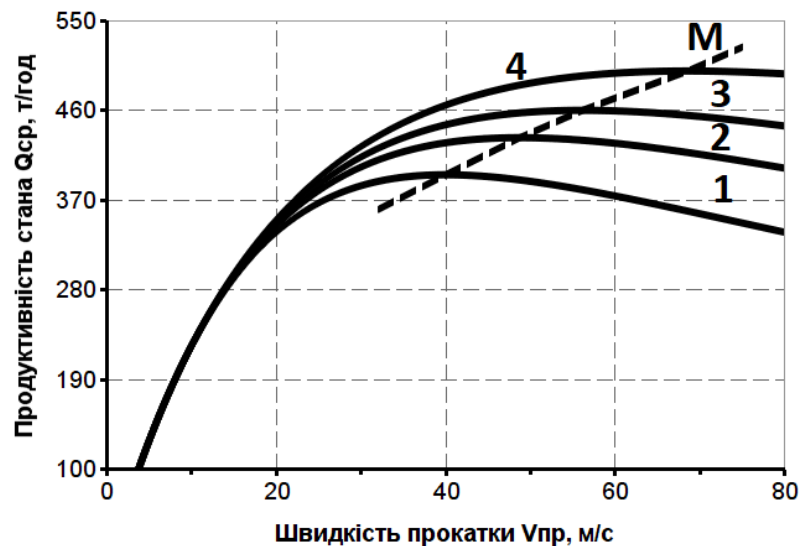
$$Q_{cp}(q_1, v_{np}) := \frac{3600 \cdot q}{c_1 \cdot \frac{q}{v_{np}} + c_2 \cdot (1+k) \cdot v_{np} + (c_3 + c_4 \cdot k) \cdot \frac{1}{v_{np}} + c_5 + k \cdot c_6 + q \cdot c_7}.$$

$$Q_{cp}(q_1, v_{np}) := \frac{90000}{\frac{482.5}{q_1} - 74.0 + \frac{9.75 \cdot v_{np}}{q_1} - \frac{145.0}{q_1} + \frac{3100}{v_{np}} + 100.8}.$$

Будуємо графіки залежностей продуктивності стана  $Q_{cp}$  від швидкості прокатки  $v_{np}$  при різних величинах маси гарячекатаного рулону перед зваркою і кількості зварних швів в холоднокатаному рулоні, рис. 4.10.

Аналіз результатів розрахунку, наведених графічно на рис. 4.10 показує, що зі збільшенням  $q_1$  від 5 до 15 т максимум продуктивності стана зміщується від 40 до 70 м/с.

Величина годинної продуктивності стана при швидкостях прокатки до 15 – 20 м/с незначно залежить від величини  $q_1$  і від кількості зварних швів в рулоні. При швидкостях прокатки більш ніж 20 м/с продуктивність значно зростає з ростом величини  $q_1$ : при зміні  $q_1$  від 5 до 15 т вона змінюється на 35 – 40 %.



1 -  $q_1 = 5$  т; 2 -  $q_1 = 7,5$  т; 3 -  $q_1 = 10$  т; 4 -  $q_1 = 15$  т;

M – максимум продуктивності стана

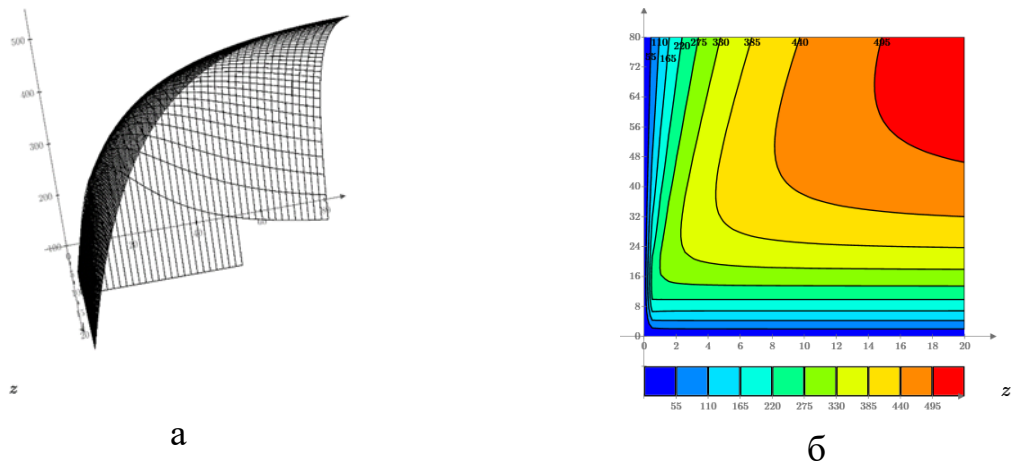
**Рисунок 4.10** – Зміна середньогодинної продуктивності чотирьохкільцевого стана 1700 в залежності від швидкості прокатки при різній масі гарячекатаного рулону перед зварюванням і кількості зварних швів в холоднокатаному рулоні  $q_1$

За допомогою функції **maximize** ( $Q_{ср}$ ,  $v_{пр}$ ) Mathcad Prime 5, знаходимо максимуми кривих 1-4 на рис. 4.10, тобто  $q_1$  для кожної кривої, будемо криву M на рис. 4.10 і результати заносимо до табл. 4.5.

**Таблиця 4.5** – Залежність критичної швидкості прокатки  $v_{кр}$ , при якій продуктивність стана максимальна, від маси гарячекатаного рулону перед зваркою і кількості зварних швів в холоднокатаному рулоні  $q_1$

|  |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Маса гарячекатаного рулону перед зваркою $q_1$ , т | 5     | 7,5   | 10    | 15    |
| Критичною швидкістю прокатки $v_{кр}$ , м/с        | 40,02 | 48,76 | 56,15 | 68,59 |
| Максимальна продуктивність стана $Q_{ср}$ , т/год  | 395,0 | 432,2 | 459,7 | 499,2 |

На рис. 4.11 наведено тривимірні графіки залежності середньогодинної продуктивності стана в залежності від швидкості прокатки і маси гарячекатаного рулону перед зваркою  $q_1$ , побудовані відповідно до рис. 4.9.



а – графік поверхні; б – графік ліній рівня (контурний графік)

**Рисунок 4.11** – Тривимірні графіки продуктивності стана в залежності від швидкості прокатки і маси гарячекатаного рулону перед зваркою

#### 4.7 Вплив товщини штаби на середньогодинну продуктивність прокатного стана

Представляє практичний інтерес також дослідження впливу товщини і ширини штаби на продуктивність прокатного стана. Розрахунок проводимо в програмному комплексі Mathcad Prime 5. Задавшись кінцевою товщиною штаби 0,6, 0,4 і 0,8 мм при постійній ширині  $b = 1,28$  м, підрахуємо для чотиривалкового стана 1700 коефіцієнти, що входять до загального рівняння (4.1):

**Товщина  $h_k = 0,6$  мм:**

За основний профілерозмір приймаємо штабу товщиною  $h_k := 0.6$  мм, шириною  $b := 1.28$  м, що прокатується з підкату товщиною  $h_0 := 2.1$  мм.

$h_1 := 1.41$  мм;  $h_2 := 1.0$  мм;  $h_3 := 0.73$  мм;  $a_p := 2.35$  м/с<sup>2</sup>;

$a_T := 2.8$  м/с<sup>2</sup>;  $v_n := 10$  м/с;  $t_{n,в} := 0.8$  год;  $l_{3,с} := 54.7$  м;  $q := 25$  т;



$$l_{ycm.n} := 19.8 \text{ м}; \quad q_1 := 5 \text{ т}; \quad \rho_n := 7.85 \text{ ; } t_{3.0} := 60 \text{ с}; \quad Q_{n.8} := 1500 \text{ т.}$$

$$l_{p1} := 7 \text{ м}; \quad l_{3.c1} := 7 \text{ м}; \quad l_{ycm.n} := 21 \text{ м}; \quad l_{12} := 3.2 \text{ м};$$

$$l_{23} := 3.1 \text{ м}; \quad l_{34} := 3.1 \text{ м}; \quad l_{4M} := 3 \text{ м.} \quad k := \frac{q}{q_1} - 1 = 4 .$$

$$c_1 := \frac{1}{\rho_n \cdot b \cdot h_k \cdot 10^{-3}} = 166 \text{ м/т}; \quad c_2 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) = 0.39 \text{ с}^2/\text{м};$$

$$c_3 := - \left( l_{3.c1} + l_{p1} \cdot \frac{h_0}{h_k} + l_{12} \cdot \frac{h_1}{h_k} + l_{23} \cdot \frac{h_2}{h_k} + l_{34} \cdot \frac{h_3}{h_k} + l_{4M} \right) = -51 \text{ м};$$

$$c_4 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n^2 - l_{ycm.n} = 18.1 \text{ м}; \quad c_5 := t_{3.0} = 60 \text{ с};$$

$$c_6 := \frac{l_{ycm.n}}{v_n} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n = -5.7 \text{ с}; \quad c_7 := \frac{3600 \cdot t_{n.8}}{Q_{n.8}} = 1.9 \text{ год/т.}$$

$$Q_{cp}(q_1, v_{np}) := \frac{3600 \cdot q}{c_1 \cdot \frac{q}{v_{np}} + c_2 \cdot (1+k) \cdot v_{np} + (c_3 + c_4 \cdot k) \cdot \frac{1}{v_{np}} + c_5 + k \cdot c_6 + q \cdot c_7};$$

$$Q_{cp}(v_{np}) := \frac{90000}{1.95 \cdot v_{np} + \frac{4171.4}{v_{np}} + 84.7} .$$

**Товщина  $h_k = 0,4$  мм:**

За основний профілерозмір приймаємо штабу товщиною  $h_k := 0.4$  мм, шириною  $b := 1.28$  м, що прокатується з підкату товщиною  $h_0 := 1.9$  мм.

$$h_1 := 1.2 \text{ мм}; \quad h_2 := 0.75 \text{ мм}; \quad h_3 := 0.5 \text{ мм}; \quad Q_{n.8} := 1000 \text{ т};$$

$$l_{p1} := 7 \text{ м}; \quad l_{3.c1} := 7 \text{ м}; \quad l_{ycm.n} := 24.6 \text{ м}; \quad l_{12} := 3.1 \text{ м};$$

$$l_{23} := 3 \text{ м}; \quad l_{34} := 3 \text{ м}; \quad l_{4M} := 2.8 \text{ м.}$$

$$c_1 := \frac{1}{\rho_n \cdot b \cdot h_k \cdot 10^{-3}} = 249 \text{ м/т}; \quad c_2 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) = 0.39 \text{ с}^2/\text{м};$$

$$c_3 := - \left( l_{3.c1} + l_{p1} \cdot \frac{h_0}{h_k} + l_{12} \cdot \frac{h_1}{h_k} + l_{23} \cdot \frac{h_2}{h_k} + l_{34} \cdot \frac{h_3}{h_k} + l_{4M} \right) = -61.7 \text{ м};$$

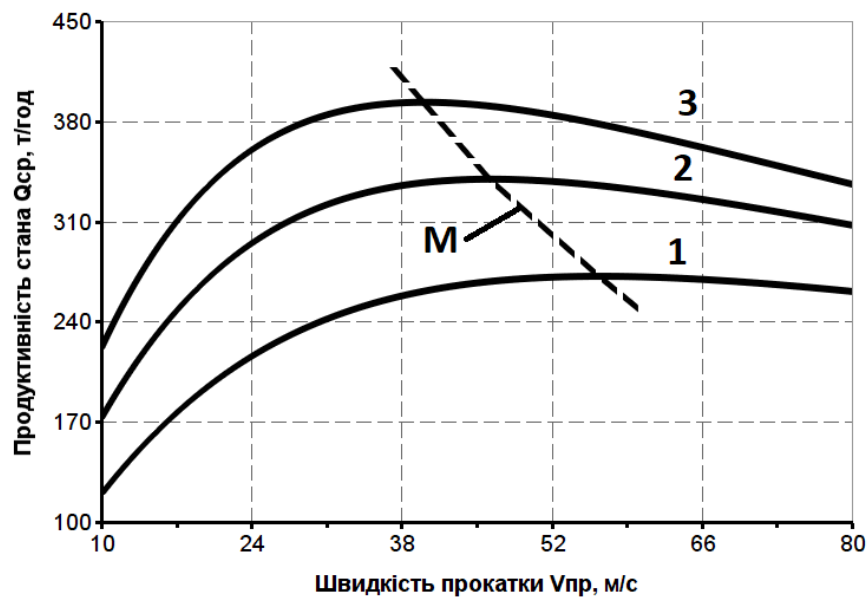
$$c_4 := \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n^2 - l_{ycm.n} = 14.5 \text{ м}; \quad c_5 := t_{3.o} = 60 \text{ с};$$

$$c_6 := \frac{l_{ycm.n}}{v_n} - \left( \frac{1}{a_p} + \frac{1}{a_T} \right) \cdot v_n = -5.37 \text{ с}; \quad c_7 := \frac{3600 \cdot t_{n.в}}{Q_{n.в}} = 2.9 \text{ год/т};$$

$$Q_{cp}(v_{np}) := \frac{90000}{1.95 \cdot v_{np} + \frac{6221.3}{v_{np}} + 111.02}.$$

Аналогічно виконуємо розрахунки для товщини штаби  $h_k = 0,8$  мм.

Будуємо графіки залежностей продуктивності стана  $Q_{cp}$  від швидкості прокатки  $v_{np}$  при різних величинах товщини штаби, що прокатується, рис. 4.12.



1 -  $h_k = 0,4$  мм; 2 -  $h_k = 0,6$  мм; 3 -  $h_k = 0,8$  мм;

M – максимум продуктивності стана

**Рисунок 4.12** – Зміна середньогодинної продуктивності чотиріклітьового стана 1700 в залежності від швидкості прокатки при різній товщині штаби, що прокатується  $h_k$

За допомогою функції **maximize** ( $Q_{\text{ср}}$ ,  $v_{\text{пр}}$ ) Mathcad Prime 5, знаходимо максимуми кривих 1-3 на рис. 4.12, тобто  $h_k$  для кожної кривої, будуюмо криву **M** на рис. 4.12 і результати заносимо до табл. 4.6.

**Таблиця 4.6** – Залежність критичної швидкості прокатки  $v_{\text{кр}}$ , при якій продуктивність стана максимальна, від товщини штаби, що прокатується  $h_k$

|  |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|
| Товщина штаби, що прокатується $h_k$ , мм                | 0,4   | 0,6   | 0,8   |
| Критичною швидкістю прокатки $v_{\text{кр}}$ , м/с       | 56,48 | 46,25 | 40,08 |
| Максимальна продуктивність стана $Q_{\text{ср}}$ , т/ГОД | 271,7 | 339,5 | 393,3 |

Графіки, наведені на рис. 4.12 показують, що при зменшенні кінцевої товщини штаби з 0,8 до 0,4 мм годинна продуктивність, природно, зменшується, але максимум кривої  $Q_{\text{ср}} = f(v_{\text{пр}})$  зміщується у бік більших швидкостей – з 40 до 56 м/с.

#### 4.8 Вплив ширини штаби на середньогодинну продуктивність прокатного стана

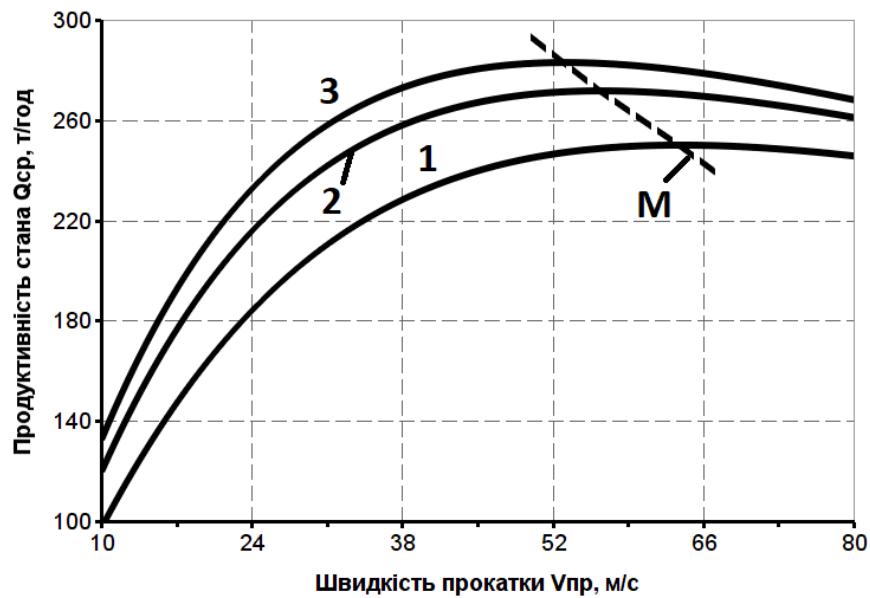
Вплив ширини штаби, що прокатується, дослідимо на прикладі прокатки на даному стані штаби мінімальної товщини  $h_k = 0,4$  мм в діапазоні  $b = 1 - 1,45$  м. Приймаючи ті ж самі вихідні дані, що і при виводі формули у розд. 4.7 для  $h_k = 0,4$  мм, отримаємо незмінні коефіцієнти  $c_2 - c_7$ . Зміниться тільки величина коефіцієнта  $c_1$ :

$$\text{при } b = 1 \text{ м} \quad c_1 = 318 \text{ м/т};$$

$$\text{при } b = 1,28 \text{ м} \quad c_1 = 249 \text{ м/т};$$

$$\text{при } b = 1,45 \text{ м} \quad c_1 = 220 \text{ м/т}.$$

Графіки, наведені на рис. 4.13 показують, що з підвищенням ширини штаби, що прокатується, разом із зростанням продуктивності стана, відбувається зміщення величини швидкості прокатки, яка відповідає максимуму продуктивності стана, у бік зменшення.



1 -  $b = 1000$  мм; 2 -  $b = 1280$  мм; 3 -  $b = 1450$  мм;

M – максимум продуктивності стана

**Рисунок 4.13** – Зміна середньогодинної продуктивності чотирикільцевого стана 1700 в залежності від швидкості прокатки при різній ширині штаби, що прокатується  $b$

За допомогою функції **maximize** ( $Q_{ср}$ ,  $v_{пр}$ ) Mathcad Prime 5, знаходимо максимуми кривих 1-3 на рис. 4.13, тобто  $b$  для кожної кривої, будуємо криву **M** на рис. 4.13 і результати заносимо до табл. 4.7.

**Таблиця 4.7** – Залежність критичної швидкості прокатки  $v_{кр}$ , при якій продуктивність стана максимальна, від товщини штаби, що прокатується  $h_k$

|   |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|
| Ширина штаби, що прокатується $b$ , мм            | 1000  | 1280  | 1450  |
| Критичною швидкістю прокатки $v_{кр}$ , м/с       | 63,84 | 56,48 | 53,09 |
| Максимальна продуктивність стана $Q_{ср}$ , т/ГОД | 250,0 | 271,7 | 283,0 |

На рис. 4.14 і в табл. 4.8 наведена зведена інформація вищенаведених розрахунків.

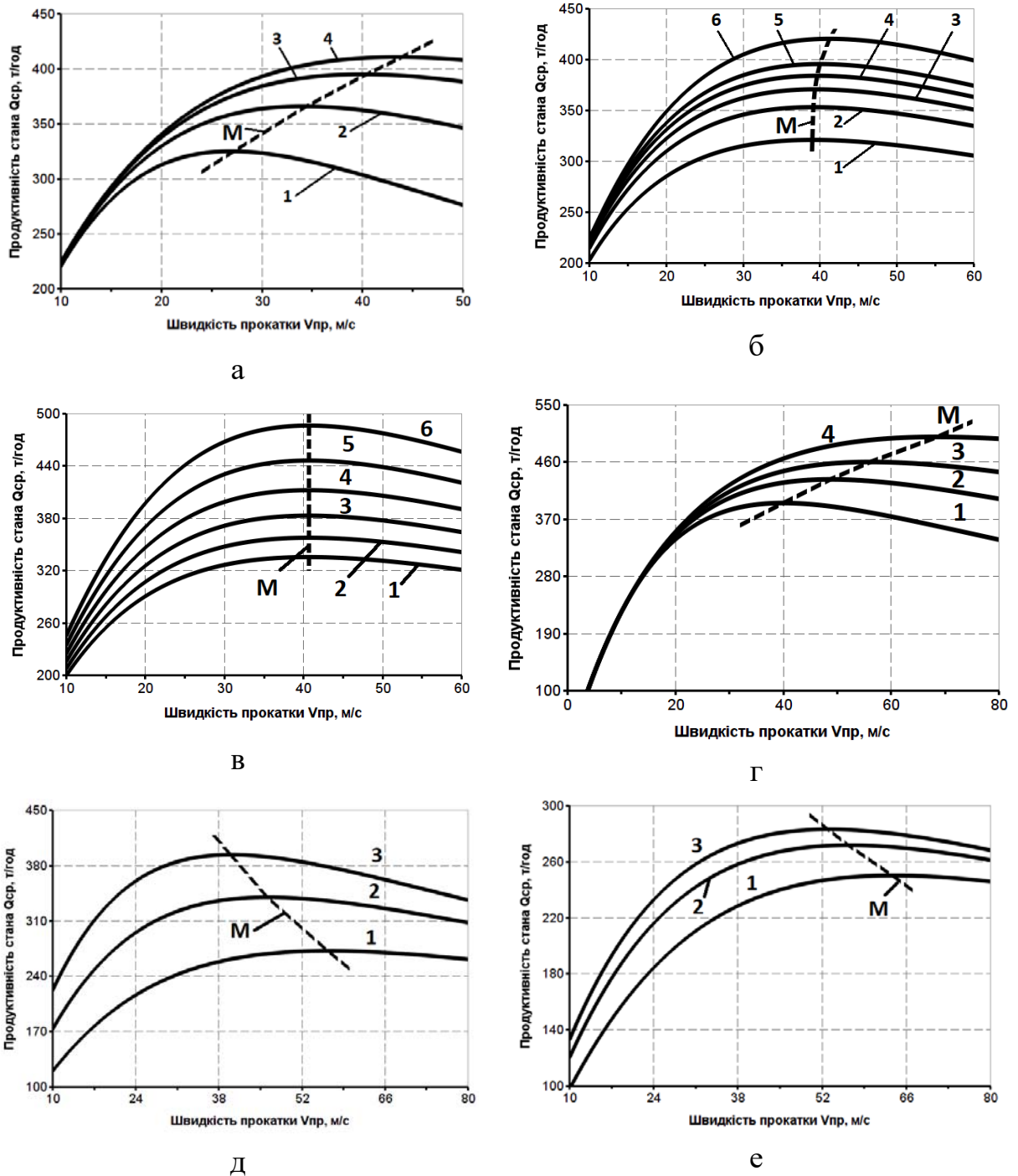
Таблиця 4.8 – Позначення до рис. 4.14

| Рис. | Параметри             | Номер кривої |      |      |      |    |    |
|------|-----------------------|--------------|------|------|------|----|----|
|      |                       | 1            | 2    | 3    | 4    | 5  | 6  |
| а    | $a_p, \text{ м/с}^2$  | 1,0          | 1,67 | 2,35 | 2,8  | -  | -  |
|      | $a_T, \text{ м/с}^2$  | 1,19         | 2,0  | 2,8  | 3,34 | -  | -  |
| б    | $v_n, \text{ м/с}$    | 2            | 4    | 6    | 8    | 10 | 15 |
| в    | $t_{з.о.}, \text{ с}$ | 140          | 120  | 100  | 80   | 60 | 40 |
| г    | $q_1, \text{ Т}$      | 5            | 7,5  | 10   | 15   | -  | -  |
| д    | $h_k, \text{ мм}$     | 0,4          | 0,6  | 0,8  | -    | -  | -  |
| е    | $b, \text{ мм}$       | 1000         | 1280 | 1450 | -    | -  | -  |

Фізичний сенс зміщень положення критичної швидкості прокатки, наведених на графіках рис. 4.2 і 4.14 полягає у тому, що при зміні того чи іншого параметру змінюється процент часу роботу стана при швидкості, що не встановилася. Як відмічалось вище, критична швидкість відповідає такому циклу, коли час прокатки при швидкості, що встановилася, дорівнює нулю (увесь цикл складається з розгонів і гальмувань). Тому при скороченні часу розгонів і гальмувань у загальному часі циклу положення критичної швидкості здвигається у бік більших швидкостей прокатки.

Це спостерігається, наприклад, при збільшенні параметрів  $a_p$ ,  $a_T$ , що дозволяє безпосередньо форсувати розгони і гальмування стана. Аналогічно при прокатуванні більш тонкої і вузької штаби (зменшенні  $h_k$  і  $b$ , див. рис. 4.14, д, е) зменшується маса штаби, що проходить крізь стан в одиницю часу. Тому на її розгони і гальмування необхідно затратити менше часу.

У той же час змінення часу допоміжних операцій (рис. 4.14, в) не змінює співвідношення між часом роботи стана при швидкості, що не встановилася і встановилася, тому положення  $v_{кр}$  не залежить від величини  $t_{з.о.}$ .



а – при різних темпах розгону і гальмування двигунів головного приводу ; б – при різній величині зниженої швидкості проходження зварних швів; в – при різному часі допоміжних і заправочних операцій; г – при різній масі гарячекатаних рулонів перед зварюванням; д – при різній товщині штаби; е - при різній ширині штаби; (М – лінія максимумів продуктивності)

**Рисунок 4.14** – Залежність середньогодинної продуктивності чотирьохкільцевого стана 1700 від швидкості прокатки:

З графіку на рис. 4.2 витікає, що на продуктивність стана суттєвий вплив здійснює маса рулонів  $q$ . При малій масі рулонів зростання продуктивності у функції швидкості прокатки відбувається значно повільніше, ніж при великій масі рулонів.

У той же час при малих швидкостях прокатки збільшення маси рулону не дає помітного збільшення продуктивності стана. Максимальна маса рулону обмежується, як відомо, співвідношенням його зовнішнього і внутрішнього діаметрів з урахуванням можливостей регулювання швидкості двигуна моталки. Однак максимальну масу рулону слід визначати економічним розрахунком.

## **5 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА**

### **5.1 Розрахунок валків листопрокатних станів на міцність і деформацію в середовищі AutoCAD Mechanical**

#### **5.1.1 Вступ**

При вивченні дисципліни «Обладнання цехів ОМТ» однією з основних цілей є оволодіння здатністю розробляти математичні моделі складальних одиниць обладнання з проведенням необхідних розрахунків і розробкою технічної документації, застосовуючи при цьому сучасні комп'ютерні технології. Це дозволяє всебічно вивчати поведінку частин обладнання ще в процесі їх розробки, аналізувати геометрію, проводити інженерні розрахунки, отримувати фотореалістичні зображення.

Питанню автоматизації комп'ютерного моделювання присвячена велика кількість робіт [15-18]. Розглядаються можливості автоматизації графічного моделювання в КОМПАС-3D, AutoCAD Mechanical, Autodesk Inventor, ABAQUS тощо, які надають інструменти проектування на основі правил і засобів автоматизації, що прискорюють процес і дозволяють користувачам концентруватися на реалізації проектного задуму, а не на моделюванні геометрії ручним способом. На базі функціональних вимог до виробу, системи САПР автоматично створюють інтелектуальні компоненти, надаючи можливість економити час проектувальника, дозволяють здійснювати перевірку моделей без випробування дослідних зразків.

Приведені в літературі дані в основному відносяться до моделювання валів редукторів, важелів, кулачків і ін. деталей машин. Дані по розрахунку валків прокатних станів із застосуванням вищенаведених програм відсутні.



### 5.1.2 Постановка задачі

Метою роботи є дослідження можливості геометричного моделювання валків прокатних станів і виконання розрахунків на міцність і деформацію в середовищі AutoCAD Mechanical 2018 [19].

Прокатні валки – змінний робочий і технологічний інструмент прокатних станів, який значною мірою визначає продуктивність станів, якість прокату, стабільність технології, енергоємність і безаварійність процесу прокатки.

При визначенні міцності валок розглядають як двохопорну балку, навантажену силою прокатки і крутним моментом, що приводить до появи в тілі валка нормальних і дотичних напружень. Розрахунковий коефіцієнт запасу міцності  $n$  повинен перевищувати допустиме значення  $[n]$ :

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma} \geq [n] \text{ або } n = \frac{\tau_B}{\tau} \geq [n], \quad (5.1)$$

де  $\sigma_B$  і  $\tau_B$  – межа міцності матеріалу валка по нормальним і дотичним напруженням, (в расчетах принимают  $\tau_B = 0,7 \cdot \sigma_B$ ), МПа;

$\sigma$  і  $\tau$  - відповідно розрахункове нормальне і дотичне напруження, МПа.

Допустиме значення коефіцієнта запасу міцності для всіх деталей прокатної кліти, окрім станини, приймають рівним 5, а для станини, як найбільш відповідального елемента прокатного стана – 10 [20].

Напруження згину в бочці валка визначають за формулою [19]:

$$\sigma_{\text{згин}} = M_{\text{згин}}/W_6 = M_{\text{згин}}/(0,1D^3) \quad (5.2)$$

де  $M_{\text{згин}}$  – згинальний момент, який діє в перетині, що розглядається, МН·м;

$W_6$  – момент опору поперечного перетину бочки валка на вигин, м<sup>3</sup>;

$D$  – діаметр бочки валка в перетині, що розглядається, м.

### 5.1.3 Методика дослідження

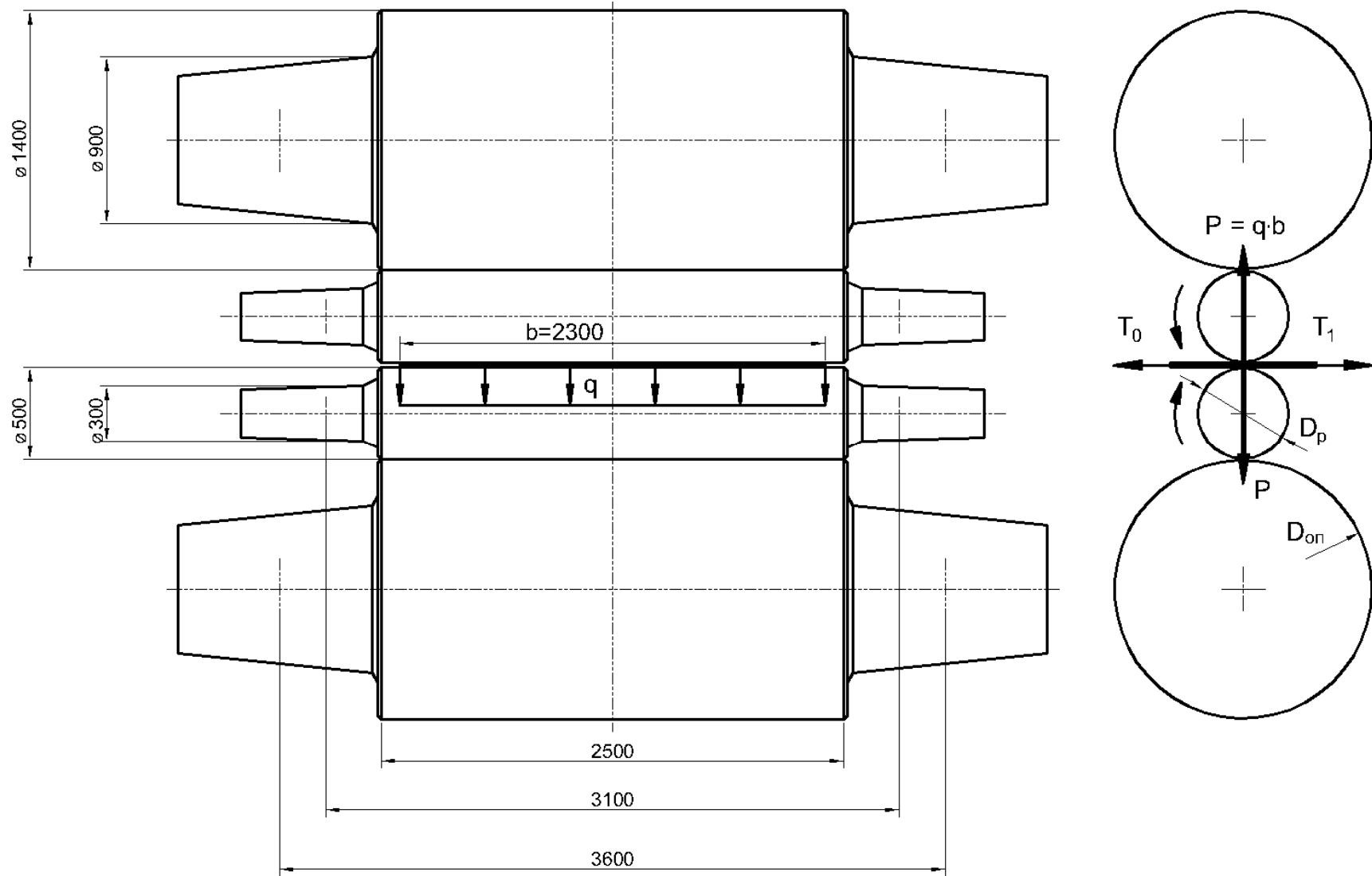
В AutoCAD Mechanical можна виконувати розрахунок валів, використовуючи контур, створений за допомогою генератора валів, або будь-який інший симетричний контур валу. Функція забезпечує статичний розрахунок, який має велике значення для розрахунку навантаження на вал і підшипники котіння або ковзання.

Основний спосіб розрахунку існуючого валу полягає у визначенні контуру і вставці сил і опор. Програма розраховує всі необхідні значення і будує відповідні епюри моментів і деформацій.

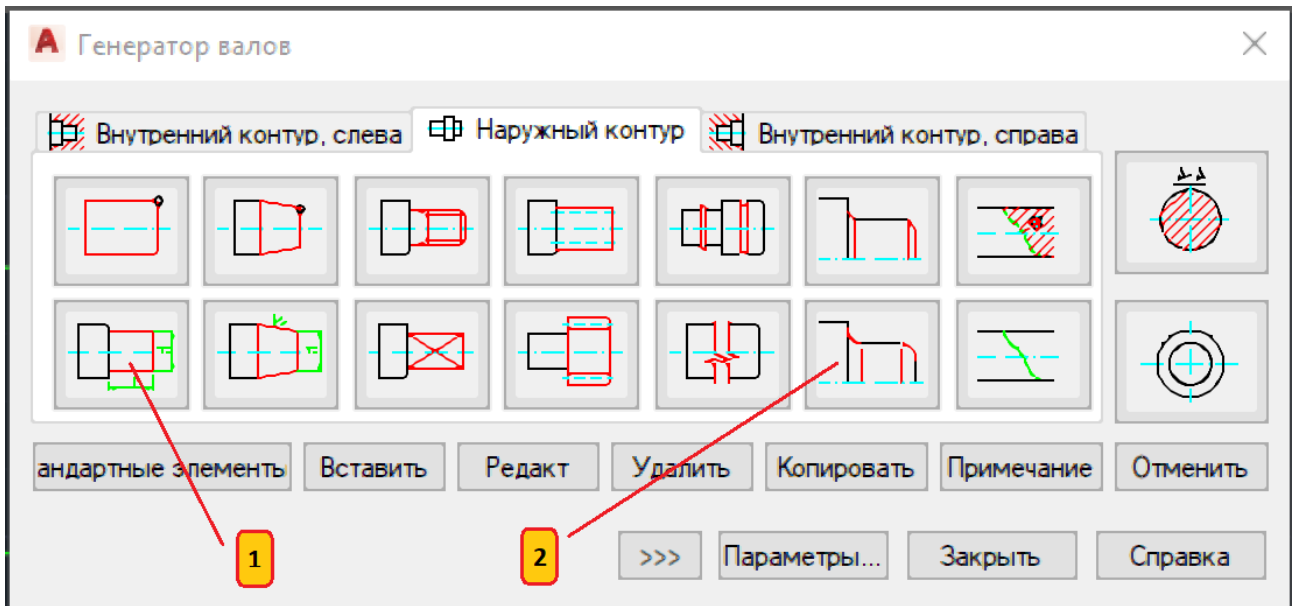
Створимо розрахункову модель і виконаємо розрахунок на міцність і деформацію робочих і опорних валків чотиривалкової кліті стана 550/1500/2500 для холодного прокатування штаб, використовуючи такі ж вихідні дані, як в прикладі 17 [20, стор. 108].

Розрахункова схема валків кліті кварто із зазначенням розмірів і навантажень приведена на рис. 5.1. Оскільки навантаження на робочий і опорний валок різні, то розрахунки проводимо окремо для робочого і опорного валка.

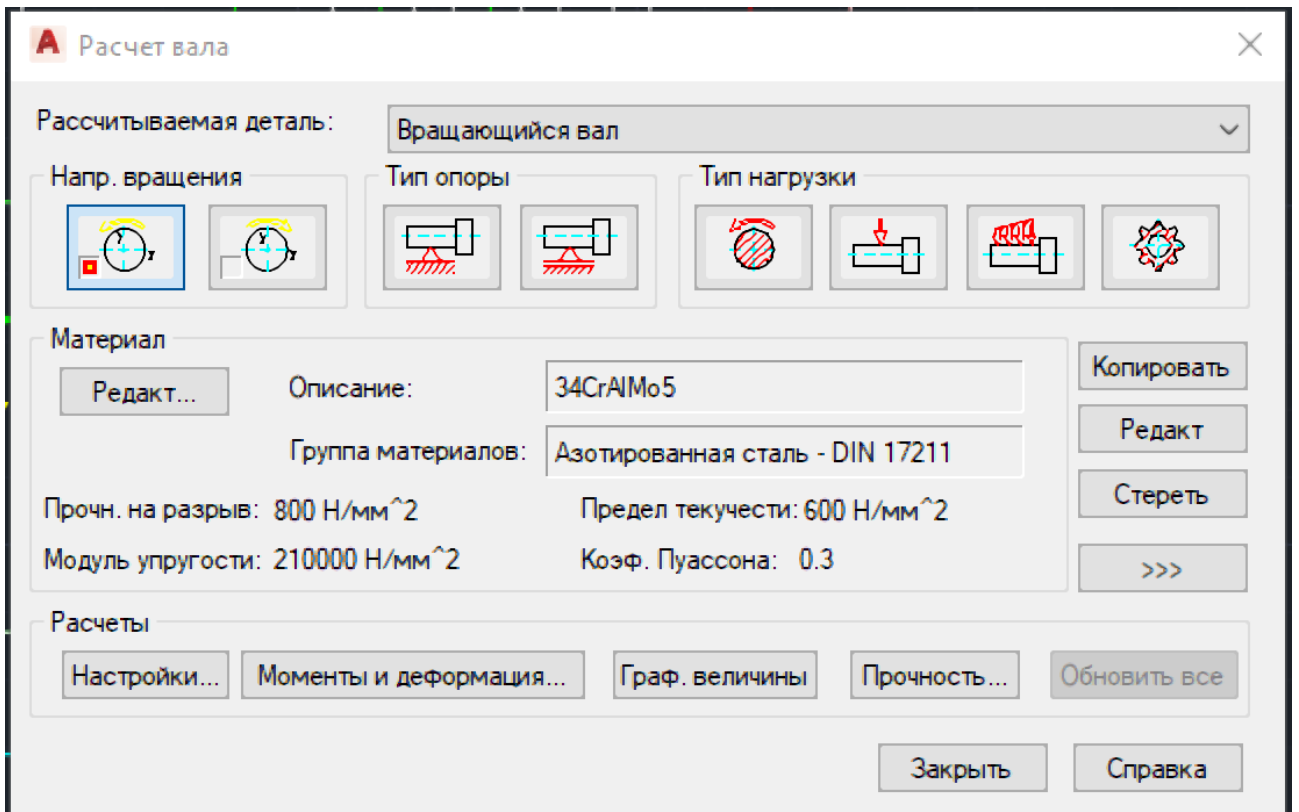
На першому етапі рішення задачі по схемі на рис. 5.1 (або по компоновальному кресленню) виконується 2D модель валка за допомогою генератора валів AutoCAD Mechanical. Перед виконанням любих розрахунків на валку необхідно створити його контур. На рис. 5.2 (а) наведено діалогове вікно «Генератор валів». За допомогою кнопки 1 будуються гладкі циліндричні ділянки валка за заданими довжинами і діаметрами. Потім за допомогою кнопки 2 добавляються галтелі.



**Рисунок 5.1** - Схема для розрахунку чотиривалкової кліти кварто на міцність і деформацію



а



б

Рисунок 5.2 - Диалогові вікна «Генератор валів» (а) і «Розрахунок валу» (б)

На другому етапі (після створення контура валка) за допомогою діалогового вікна "Розрахунок валу" (рис. 5.2 б) проводиться розрахунок. Вихідними даними для розрахунку валка є: матеріал валка, момент крутіння на робочому валку; сили, що діють на валок у вертикальній і горизонтальній площині.

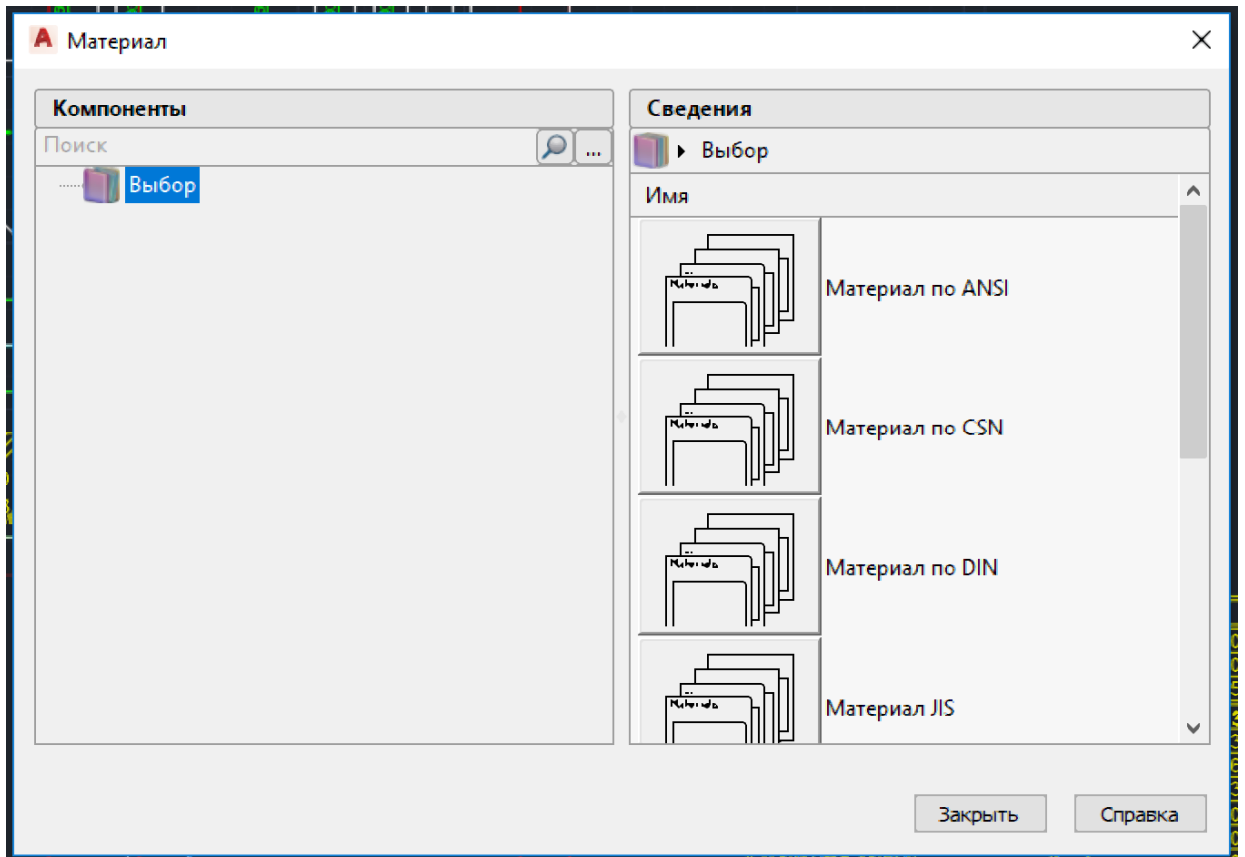
Матеріал валка вибирається за допомогою опції «Редагувати». Відкривається діалогове вікно «Матеріал» (рис. 5.3 а), в якому вибирається стандарт матеріалу. У нашому розрахунку вибирається німецький стандарт DIN. Виводиться вікно з різноманітними марками сталей і інших металів (рис. 5.3 б). Ми вибираємо сталь 34CrAlMo5 (аналог вуглецевої сталі 9Х2 і 9ХФ з підвищеним вмістом хрому і марганцю), що має межу текучості  $\sigma_T = 600$  МПа і межу міцності  $\sigma_B = 800$  МПа.

Виводиться діалогове вікно вибору властивостей матеріалу валка (рис. 5.4), в якому можна відредагувати показники міцності, вид термомеханічної обробки тощо.

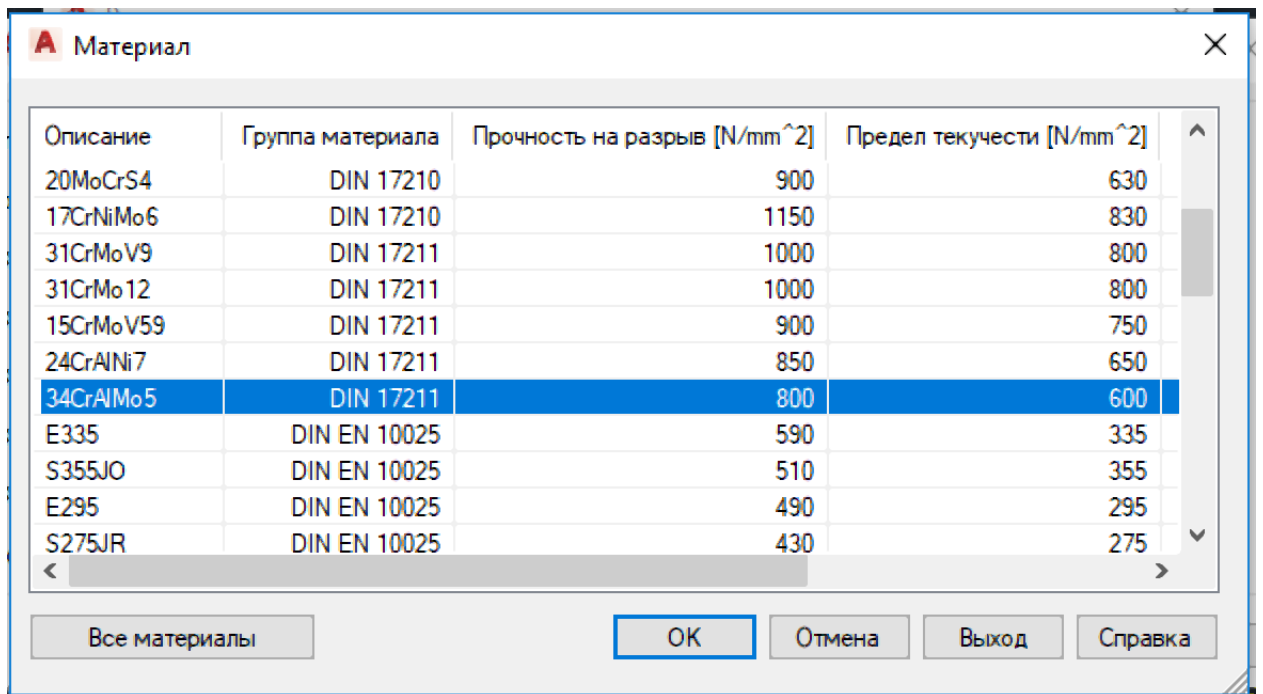
Після цього вибирається тип опор (рис. 5.2 б) і місце їх розташування на валку. Вказуються корисні навантаження. В AutoCAD Mechanical при розрахунку навантаження використовується геометрія креслення. У нашому прикладі навантаження є розподіленим по ширині штаби (рис. 5.1 і 5.5 б), але може застосовуватися і крапкове, зосереджене навантаження (рис. 5.5 а). Вказується крутний момент на валку (рис. 5.5 в) і результат побудови розрахункової схеми виглядає так, як показано на рис. 5.6 і 5.7.

На заключному етапі проектування валка в AutoCAD Mechanical виконується робоче креслення з виносними елементами, проставляються розміри, позначення, допуски тощо.

Генератор валів автоматично обчислює реакції опор і будує епюри згинальних моментів і напруг. Розрахунок на міцність виконується відповідно до німецького стандарту DIN 743.



а



б

Рисунок 5.3 - Диалогові вікна вибору матеріалу валка

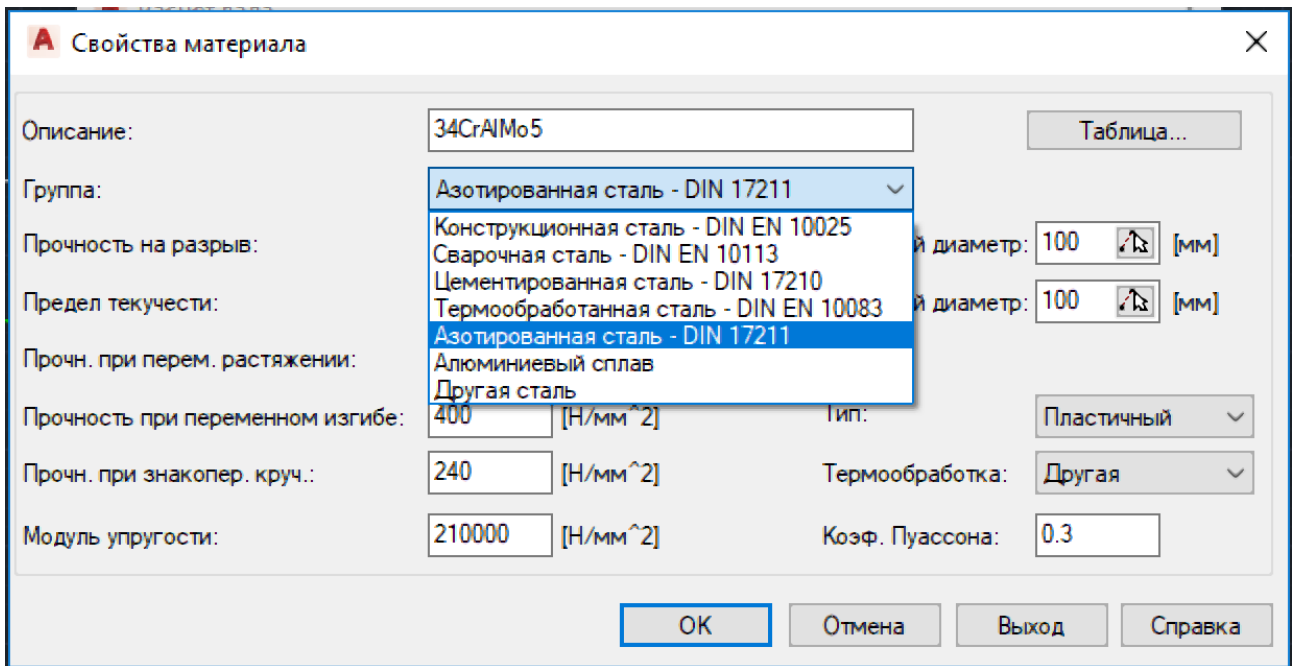
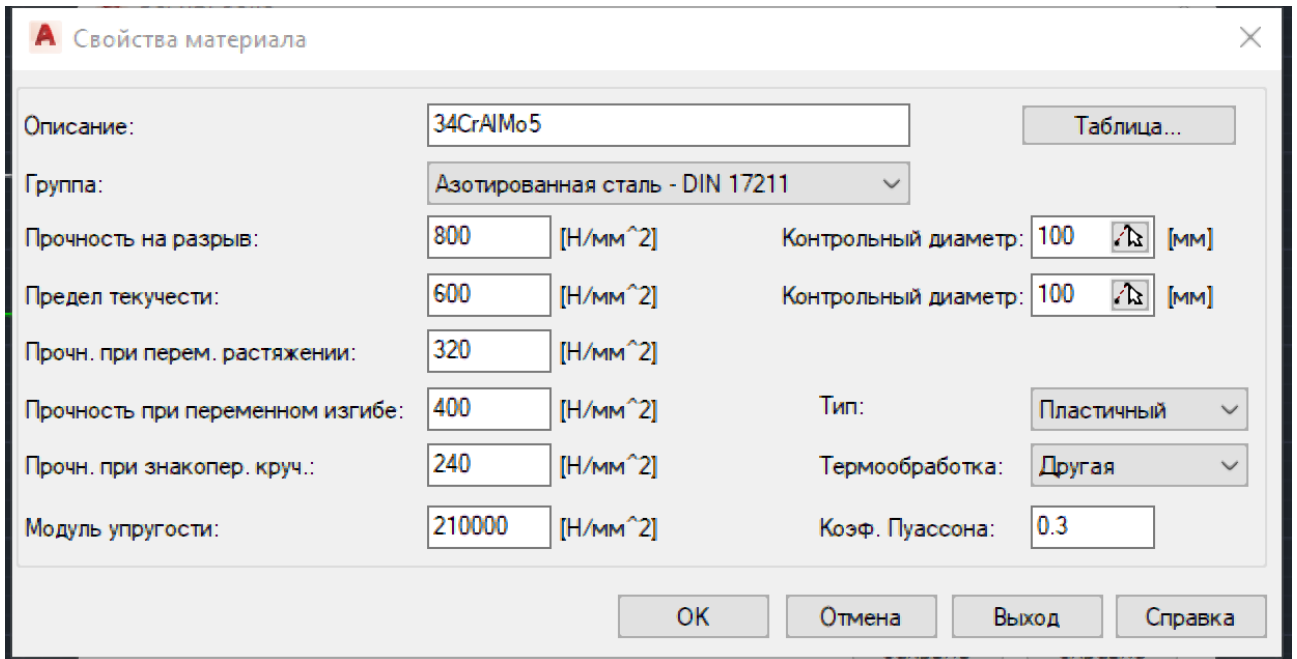
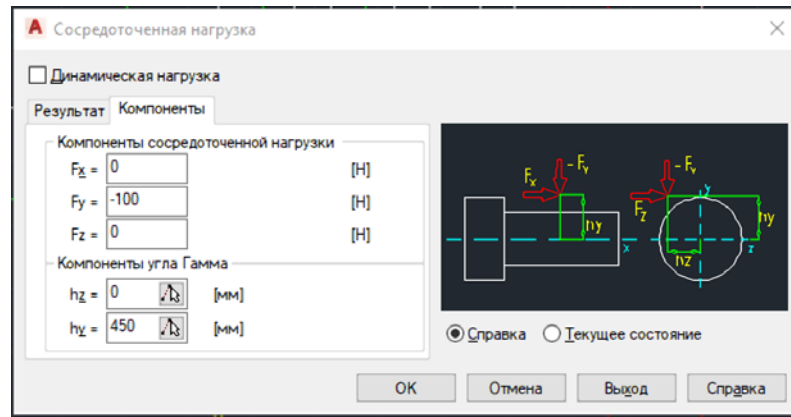
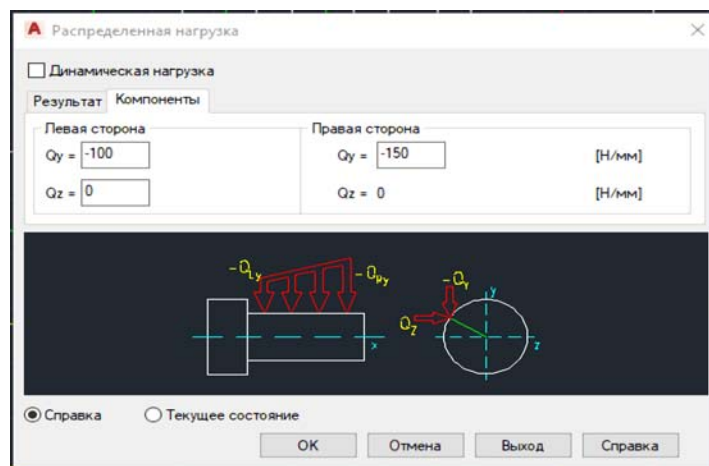


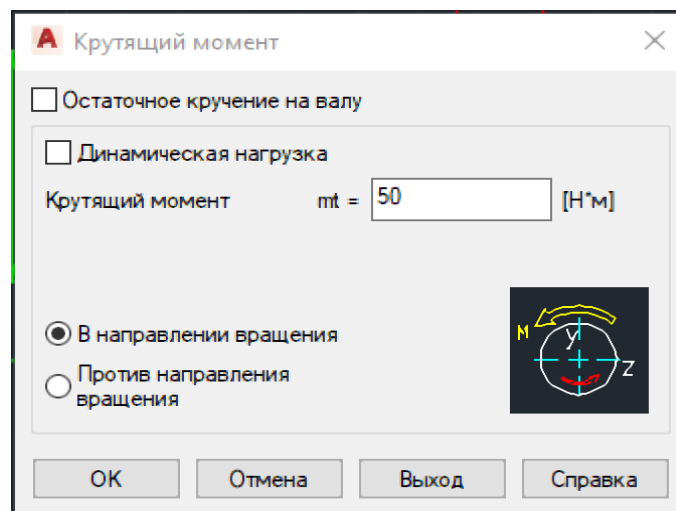
Рисунок 5.4 – Диалогові вікна вибору властивостей матеріалу валка



а



б



в

Рисунок 5.5 – Типы навантажень на валок: а – зосереджене;  
б – розподільне; в – крутний момент



### 5.1.4 Результати досліджень

Результати розрахунків робочого і опорного валків представлені відповідно на рис. 5.6 і 5.7. По отриманим епіюрам визначаються небезпечні перетини валка – по середині бочки і в шийці валка по галтелі (у місці з'єднання шийки і бочки валка). При необхідності уточнюється геометрія валка. При цьому генератор валів автоматично перераховує всі дані. На завершальному етапі виконується робоче креслення валка.

Порівнюючи розрахункові дані, приведені в літературі з обчисленими значеннями в AUTOCAD Mechanical можна перекоонатися, що вони мають близькі значення. Так коефіцієнт запасу статичної міцності **по межі текучості** для опорного валка (крутний момент відсутній) дорівнює 5,3 (рис. 5.7), а в літературі [20] – 5,2 в перетині 1-1. У шийці робочого валка визначений тільки запас міцності при крученні  $n_{\tau} = 6,8$  [20]; за нашими даними коефіцієнт запасу міцності з урахуванням кручення і вигину дорівнює  $n_{ш}^p = 4,4$  (рис. 5.6), що також достатньо [20, стор. 109]. При сумісній дії кручення і вигину сумарна (еквівалентне) напруга в шийці для сталевих валків визначається по формулі (дані узяті на рис. 5.6):

$$\sigma_{\text{ЭКВ.Ш}}^p = \sqrt{\sigma_{\text{ИЗ.Ш}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{КР.Ш}}^2} = \sqrt{21,2^2 + 3 \cdot 78,4^2} = 137,4 \text{ МПа.}$$

$$n_{\text{Ш}}^p = \frac{\sigma_{\text{T}}}{\sigma_{\text{ЭКВ.Ш}}^p} = \frac{600}{137,4} = 4,4.$$

Визначимо розрахункові коефіцієнти запасу міцності **по межі міцності**, використовуючи формулу (5.1) і розрахункові донні на рис. 5.6 і 5.7:

$$\text{у бочці опорного валка: } n_{\text{б}}^{\text{оп}} = \frac{\sigma_{\text{В}}}{\sigma_{\text{ИЗ.б}}^{\text{оп}}} = \frac{800}{78,3} = 10,2,$$

$$\text{у шийці опорного валка: } n_{\text{ш}}^{\text{оп}} = \frac{\sigma_{\text{В}}}{\sigma_{\text{ИЗ.Ш}}^{\text{оп}}} = \frac{800}{121,5} = 6,6,$$

$$\text{у шийці робочого валка: } n_{\text{ш}}^p = \frac{\tau_{\text{В}}}{\tau_{\text{КР.Ш}}^p} = \frac{800 \cdot 0,7}{78,4} = 7,1.$$

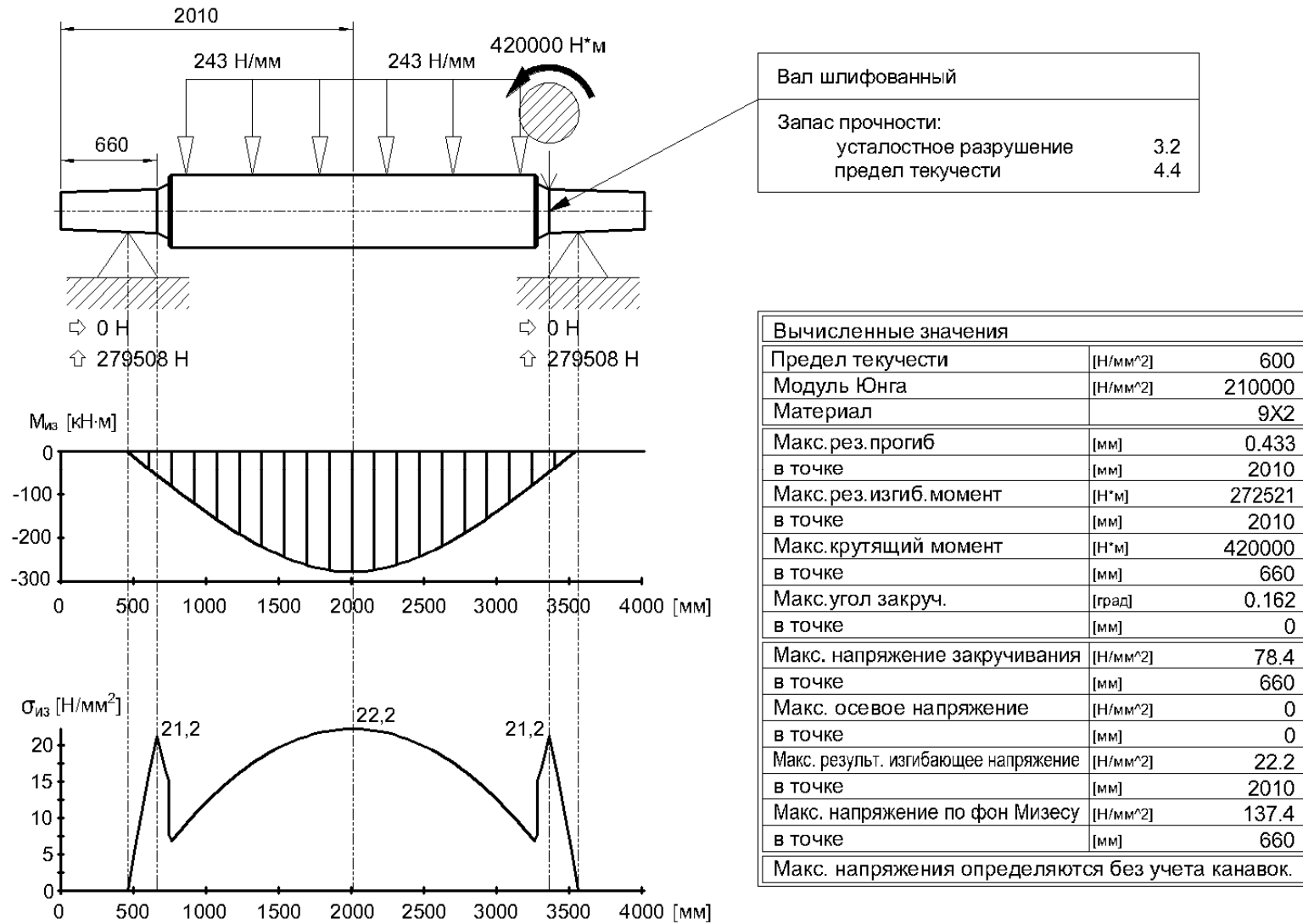


Рисунок 5.6 – Результаты розрахунку робочого валка на міцність і деформацію

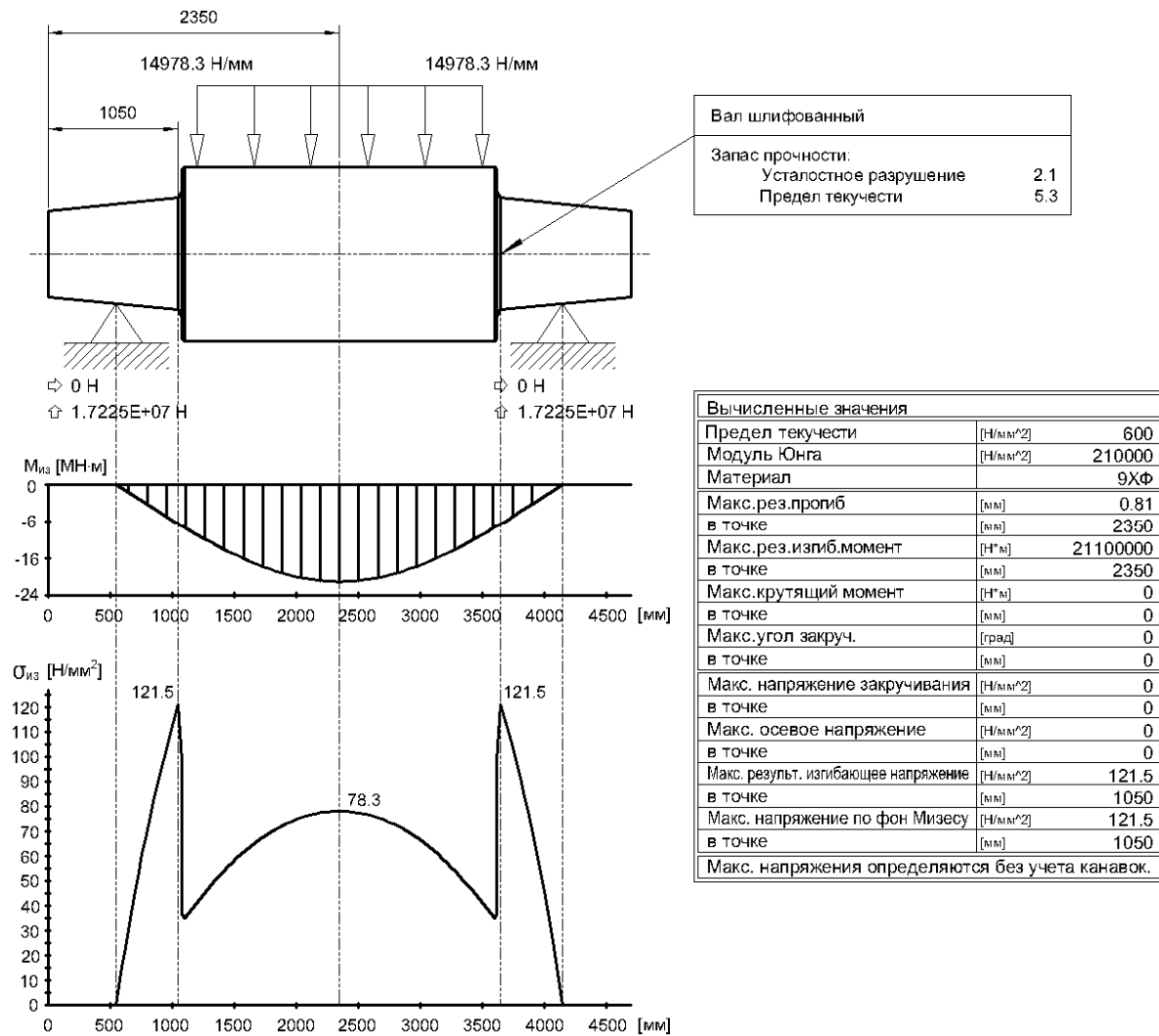
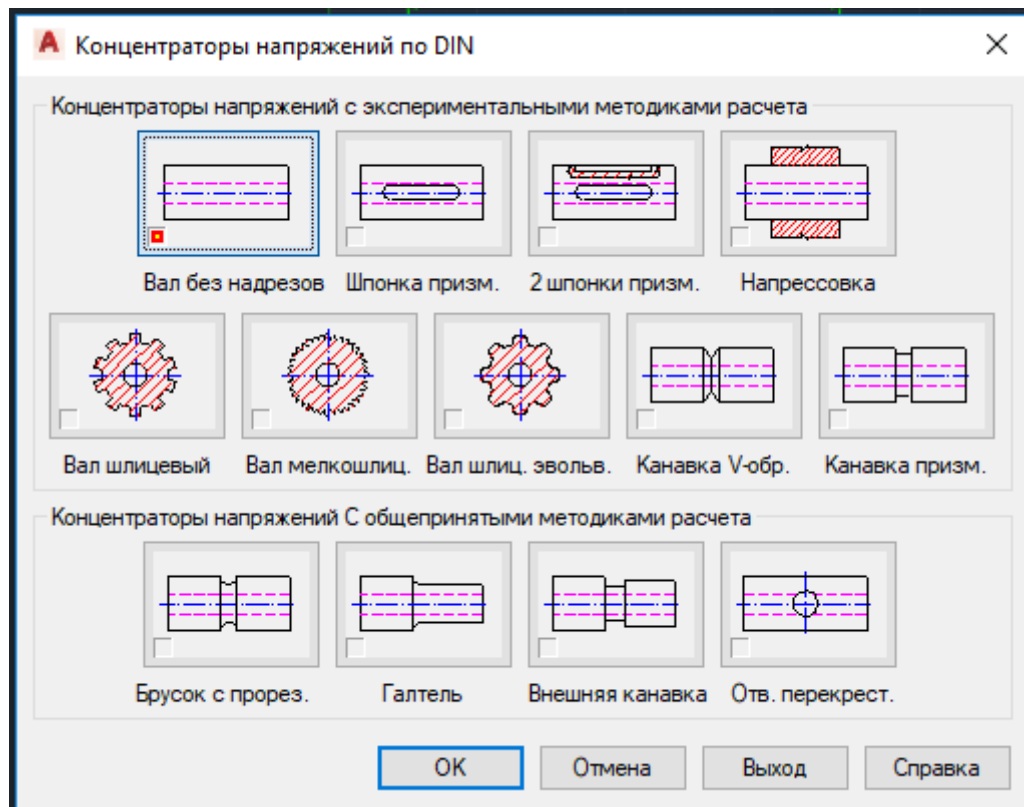


Рисунок 5.7 – Результаты розрахунку опорного вала на міцність і деформацію

Програма AutoCAD Mechanical має можливість враховувати при розрахунках міцності велику кількість концентраторів напружень, різноманітних коефіцієнтів, меж міцності, плинності і втомні при симетричних і несиметричних циклах згинання і крутіння, стану поверхні матеріалу тощо (рис. 5.8), що дозволяє виконувати розрахунки на міцність досить швидко і з великою точністю.



**Рисунок 5.8** – Вибір концентраторів напружень в AutoCAD Mechanical при згинанні і крутінні валка

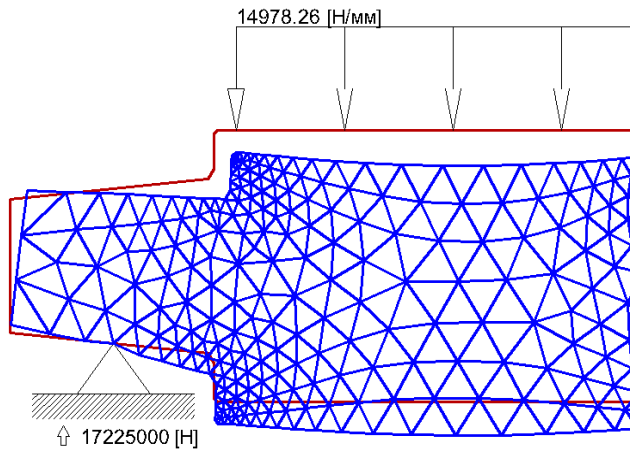
Крім того, AUTOCAD Mechanical виконує розрахунок на витривалість (втомну або циклічну міцність) в будь-якому перетині валка. Для робочого і опорного валків коефіцієнт запасу втомної міцності в шийці валка по галтелі (у місці з'єднання шийки і бочки валка) відповідно дорівнює 3,2 і 2,1 (рис. 5.6 і 5.7). Мінімальне допустиме значення цього коефіцієнта 1,3 – 2,5 [21].

Таким чином, всі отримані коефіцієнти запасу міцності вище допустимого  $[n]=5$ , тобто всі елементи валків мають достатню міцність, а

найбільш слабкими елементами валків є шийка в місці з'єднання з бочкою валка. Цей перетин є концентратором напруження.

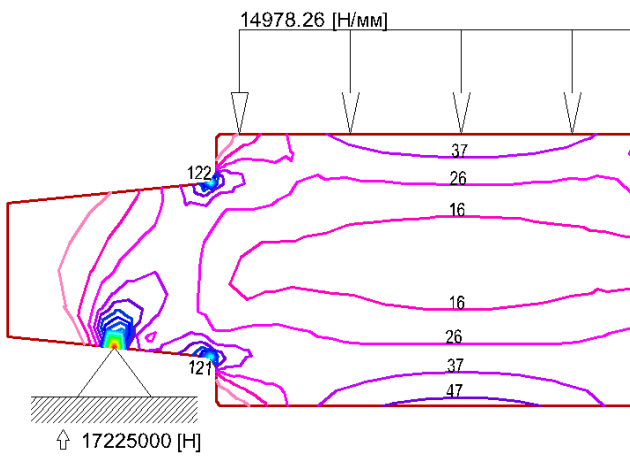
Прогинання валків впливає на нерівномірність товщини прокатуваної штаби по ширині і на жорсткість прокатної кліті. Прогинання опорного валка, визначене AUTOCAD Mechanical (рис. 5.7 і 5.9) складає по середині бочки 0,81 мм, обчислене в літературі – 0,86 мм [20], що достатньо близько.

AutoCAD Mechanical дозволяє виконувати також оцінку напружено-деформованого стану металу методом скінчених елементів (МСЕ) [18]. Ці результати можуть бути використані для удосконалення конструкції прокатного валка. Мета методу – дати уявлення про розподіл напружень і деформацій. На рис. 5.9 (а-в) представлені результати розрахунку опорного валка МСЕ, які показують, що локалізація напружень відбувається на поверхні валка, в опорах і по галтелі, в місці з'єднання шийки і бочки валка. Умовно опори валка показані точковими, тому і напруження в них максимальне. На практиці валки встановлені на підшипниках і навантаження розподіляється по всій ширині підшипникового вузла, що можна врахувати при розрахунках в AutoCAD Mechanical.

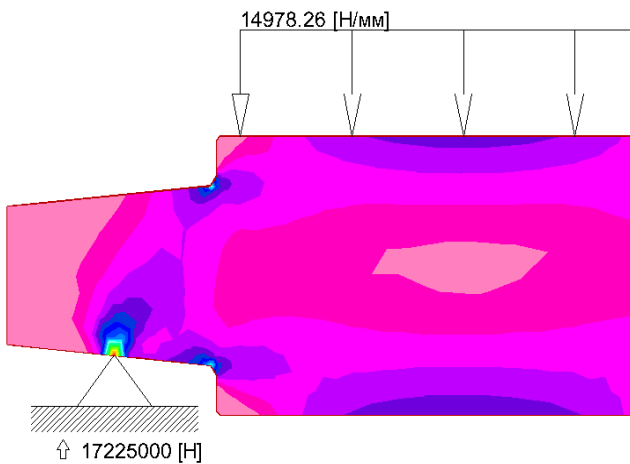
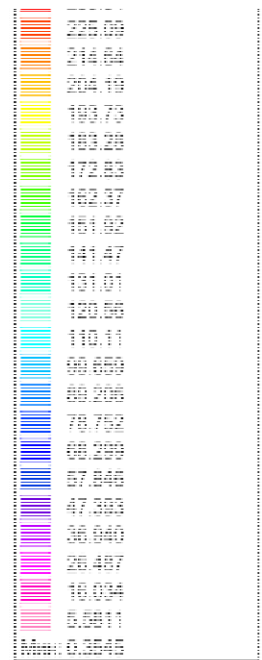


|                    |
|--------------------|
| Материал: 9ХФ      |
| Толщина d = 1320   |
| Разр. деформ. по Z |
| Деформации [мм]    |
| МксX: 0.4875       |
| МксY: -0.809       |
| Козф: 226.25       |

а



б



в

**Рисунок 5.9** – Розрахунок методом скінчених елементів опорного валка на деформацію (а); ізолінії (б) і ізообласті (в) напружень у валку

## 6 АНАЛІЗ СОБІВАРТОСТІ ПРОДУКЦІЇ

Виробництво та реалізація продукції потребують трудових, матеріальних і грошових витрат. Витрати підприємства на спожиті засоби виробництва, предмети праці й оплату праці працівників, виражені в грошовій формі, утворюють собівартість продукції.

**Собівартість продукції** - це основний якісний показник роботи підприємства. Її рівень відбиває досягнення та недоліки роботи як підприємства в цілому, так і кожного структурного підрозділу. Систематичне зниження собівартості продукції має важливе народногосподарське значення, бо дає змогу за стабільних ринкових цін збільшувати прибуток на кожну гривню витрат, підвищує конкурентоспроможність продукції [22].

Аналіз собівартості продукції має такі **завдання**: перевірка обґрунтованості прийнятих управлінських рішень щодо собівартості; об'єктивна оцінка виконання прийнятих рішень, під час якої виявляються відхилення фактичних витрат від прогнозних; з'ясування чинників цих відхилень; підрахунок резервів дальшого зниження собівартості продукції; розроблення заходів із мобілізації внутрішньовиробничих резервів та використання їх у виробництві.

Для проведення аналізу використовуються такі **джерела інформації**: прогнозова собівартість продукції; аналітичні розрахунки, норми й нормативи споживання ресурсів; звітна інформація, зокрема «Звіт про фінансові результати» ф. 2, «Звіт з праці» ф. 1-ПВ і ф. 3-ПВ, дані оперативного обліку.

Облік, прогнозування та аналіз собівартості спирається на такі **узагальнюючі показники**.

- 1) собівартість одиниці продукції;
- 2) виконання прогнозу зниження собівартості порівнянної продукції;
- 3) виграти на 1 грн товарної продукції.

Для досягнення конкурентоспроможності підприємство змушене постійно прогнозувати зниження собівартості своєї продукції.

Для визначення обґрунтованості прогнозового рівня собівартості виробленої продукції, використовують дані про залишки нереалізованої продукції на початок і кінець року, обсяг реалізації та складають розрахунок (таблиця 6.1).

Фактичні витрати на 1 грн виробленої продукції порівнюють із прогнозними, визначають та оцінюють наявні відхилення.

З таблиці 6.1 бачимо, що за прогнозового обсягу реалізації в оптових цінах підприємства 12484,5 тис. грн та прогнозового прибутку від реалізації 2437,5 тис. грн, собівартість реалізованої продукції становить 10047 тис. грн, а прогнозова собівартість товарної продукції з урахуванням зміни прогнозних залишків нереалізованої продукції на початок і кінець року - 10174,5 тис. грн.

**Таблиця 6.1** - Розрахунок рівня собівартості продукції, тис. грн.

| № | Показник  | За оптовими<br>цінами<br>підприємства | За<br>прогнозовою<br>собівартістю | Прибуток | Витрати<br>на 1 грн<br>продукції |
|---|---|---------------------------------------|-----------------------------------|----------|----------------------------------|
| 1 | Залишки<br>нереалізованої<br>продукції на<br>початок року | 615                                   | 480                               | 135      | 78,05                            |
| 2 | Реалізація<br>продукції                                   | 12484,5                               | 10047                             | 2437,5   | 80,48                            |
| 3 | Залишки<br>нереалізованої<br>продукції на<br>кінець року  | 730,5                                 | 607,5                             | 123      | 83,16                            |
| 4 | Випуск товарної<br>продукції (ряд. 2 +<br>ряд. 3-ряд. 1)  | 12600                                 | 10174,5                           | 2425,5   | 80,75                            |



Зазвичай внаслідок систематичного зниження собівартості витрати на одну гривню продукції в залишках нереалізованої продукції на кінець року мають бути нижчі від середньорічних, а в собівартості товарного випуску - нижчі, ніж у собівартості реалізованої продукції, бо в останню закладено підвищені витрати в залишках нереалізованої продукції на початок року.

На підприємстві, яке ми аналізуємо, цієї вимоги не додержало, собівартість товарної та нереалізованої продукції постійно зростає, а тому зменшується прибуток на одну гривню продукції. Високий рівень витрат у залишках нереалізованої продукції був спричинений зростанням цін на матеріали і зниженням попиту на дорогу продукцію. Ця обставина може призвести до погіршення фінансового стану підприємства.

Маючи розрахунковий рівень собівартості товарної продукції, обчислюють прогнозове завдання щодо її зниження проти минулого звітного періоду і розробляють прогноз організаційно-технічних заходів, який забезпечить це зниження.

Міра ефективності використання матеріальних, трудових і грошових засобів з найбільшою повнотою розкривається під час вивчення собівартості товарної продукції, бо об'єктом аналізу стають ресурси підприємства, використані для основної діяльності.

*Аналіз собівартості товарної продукції* починають із загальної оцінки виконання прогнозу собівартості, визначають відхилення звіт-них показників від прогнозних, їх динаміку, виявляють фактори, що вплинули на це відхилення, роблять відповідні висновки.

На підставі облікових даних одержано таку інформацію:

- випуск товарної продукції за прогнозом - 12600 тис. грн, фактичний - 12750 тис. грн;
- собівартість продукції за прогнозом - 10174,5 тис. грн, фактично - 10717,5 тис. грн, собівартість фактично випущеної продукції за прогнозними нормами і фактичною структурою - 10437 тис. грн.

Порівняння фактичної собівартості з прогнозовою показало, що абсолютне відхилення дорівнює 543 тис. грн. Це відхилення виникло під впливом таких факторів:

- 1) зміни обсягу продукції;
- 2) зміни структури виробленої продукції;
- 3) зміни рівня витрат (за рахунок зміни кількості використаних матеріалів, цін на сировину і матеріали).

Для виявлення впливу цих факторів виконаємо такі розрахунки:

- 1) визначаємо рівень виконання прогнозу виробництва товарної продукції:

$$12750:12600 - 100 = 101,19\%;$$

- 2) підраховуємо собівартість фактичного випуску продукції за прогнозними нормами і структурою:

$$10437 - 101,19:100 = 10561,25 \text{ тис. грн};$$

- 3) визначаємо вплив зміни обсягу товарної продукції на собівартість:

$$10561,25 - 10174,5 = 386,75 \text{ тис. грн};$$

- 4) визначаємо вплив зміни структури на собівартість:

$$10437 - 10561,25 = -124,25 \text{ тис. грн};$$

- 5) визначаємо вплив зміни рівня витрат на собівартість:

$$10717,5 - 10437 = 280,5 \text{ тис. грн.}$$

Загальне відхилення становить:  $386,75 - 124,25 + 280,5 = 543$  тис. грн.

Підприємство допустило небажане зростання собівартості на 280,5 тис. грн - за рахунок зміни рівня витрат, проте за рахунок покращення структури на 124,25 тис. грн воно дещо знизило собівартість [22].

## 7. ОХОРОНА ПРАЦІ

Система «Охорона праці» на ВАТ МК «Запоріжсталь» функціонує в співвідношені з нормативними актами в області охорони праці:

- Конституція України (ст.43- 48)
- Закон України «Про пожежну безпеку» (в 1993р.)
- Положення про службу охорони праці на підприємстві ПАТ «Запоріжсталь»[23];
- Правила безпеки в прокатному виробництві (ДНАОП 1.2.10- 1.04-97)

### 7.1 Технічні рішення відносно безпеки експлуатації безперервного 4-х клітьового стану «1680»

Основними небезпечними виробничими факторами при обслуговуванні безперервного 4-х клітьового стану «1680» є: ураження робітників електричним струмом та опіки електричною дугою; затягування одягу та частей тіла валками, обертаючимися шпинделями, муфтами; порізи робочих гострими кромками металу; удари та садни, отримані в результаті обриву металу; відліт частиць металу.

Для запобігання враження робочих електричним струмом відкриті струмоспровіджуючі частки двигунів (коллектори, кілця, щітки) огороджують підходи до обмоток статора електродвигунів ізолюють та захищають від механічних ушкоджень. Кожухи електродвигунів та рубильників корпуса щітків управління заземлюють. Управління електродвигунами здійснюють дистанційно за допомогою пультів управління прокатного стану.

Для попередження травматизму при прокатці металу необхідно максимально механізувати та автоматизувати роботу прокатного стану. Для попередження травмування працівників з'єднувальні шпенделя та муфти огороджують не тільки з боку, але і зверху. Для попередження виходів розкату в бік прокатне поле рекомендується огороджувати міцними сплошними бортами з нахлону.

У зв'язку з можливістю відкалування та відліту обломків металу від валків під час прокатки а також розрив прокатуваної штаби, збоку клітей необхідно встановити запобіжні металеві сітки.

Підлогу біля стану необхідно періодично очищати від емульсій та мастила та посипати тирсою. На робочих місцях вальцовщиків підлога має бути рефлена або мати бодай точкову наварку.

Запобіжні кожухи прокатного стану необхідно обов'язково обладнати блокуванням, яка виключає можливість включення стану при відсутності працівників.

Моталка стану повинна бути огорожена захисними воротами. Конструкція, установка та огороження моталки повинна виключати можливість вибивання металу при зматуванні. Прорізи прокатних клітей зі сторони обслуговування стану повинні бути закриті з'їмними щитками.

Вентелі, які регулюють кількість подаваної емульсії повинні бути винесені в бік від клітей на безпечну відстань. На клітях повинна бути встановлені відбивні щітки, які запобігають розбризгування емульсії на робочі місця.

Під час застосування змаски повинні бути прийняті міри які виключають наявність шкідливих речовин в робочій зоні.

Прокатка рулонів які мають закатану кромку штаби, рваніни, складки, та інші дефекти, забороняється.

В процесі прокатки забороняється знімати рулони з конусів разматувача без зняття напруги а також відключення насосів гідравлики.

При прокатуванні вимірювання натягу штаби повинно замірюватися спеціальними пристроями. Для попередження травмування визначати натяг штаби рукою або брусом забороняється.

Для захисту працівників від відлітаючих осколків стан повинен бути обладнаним спеціальними екранами.

Для переходу крізь з'єднувальні вали кожної кліті повинні бути встановлені пристрої одного сплошного мостіка вдоль всіх клітей зі спуском до кожної з них.

Головний пост управління стана повинен мати переговорний зв'язок и сигналізацію з машинним залом и пультами керування.

Для запобігання травмування працівників та обслуговуючого персоналу стана, пуск стана повинен бути після подачі відповідного сигналу, який повинен бути почутним на усіх робочих місцях стана і на всіх його огорожуючих та запобігаючих пристроях.

Пуск стана в несправному стані, а також при відсутності чи несправності огорожуючих та запобігаючих пристроїв забороняється.

Для запобігання травмування робити заміну механізму або деталей стану під час прокатування металу забороняється.

Замір профіля металу під час роботи стану дозволяється робити лише дистанційно за допомогою відповідних вимірюючих пристроїв.

Збір не докату та браку, а також заміна зламаних валків повинно відбуватися спеціальними пристроями згідно з розробленими схемами зацепки та страховки при розібраних електро схемах механізму та відключених головних двигунів стану під керівництвом майстра, а при його відсутності – старшого вальцовщика.

Шліфування та видалення дефектів з робочої поверхності валків, а також роликів рольгангів травільних машин, моталок, и т.д. повинні виконуватися при зупинці прокатки за допомогою спеціального пристроя з боку протилежного напрямку обертання.

Для запобігання травмування працівників бокові поверхності підъемно качаючихся столів повинні бути обшиті листовим металом. При положенні стола зверху обшивка не повинна бути більша плитового настола робочого місця.

Ходити по рольгангам стану забороняється. Переходити через них дозволяється тільки по перехідним місткам. Висота та конструкція перехідного містка над прокатним полем повинно забезпечувати безпеку при проходженні людей.

## ВИСНОВКИ

1. На сучасному етапі розвитку прокатного виробництва основною тенденцією слід вважати освоєння і впровадження у виробництво принципово нової техніки і технології, що забезпечує поряд зі збільшенням обсягу виробництва - підвищення якості листової сталі. Зниження витрат на виробництво і економія енергетичних ресурсів є одними з найважливіших завдань в металургії, так як вона найбільш енергоємна галузь народного господарства.

2. В технологічній частині магістерської роботи запропоновано здійснити сортування сталі за вмістом вуглецю та збільшити товщину підкату з 2 до 2.2 мм. Впровадження нової технології дозволить зменшити завальцювання рулонів штаби, зменшити енергосилові витрати при прокатуванні та кількість відбракованого металу.

Запропонована технологія має також наступні переваги:

- вона не потребує великих матеріальних витрат і фінансових внесків;
- поліпшення якості гарячекатаних рулонів, які надходять з ЦГПТЛ до ЦХП-1 за рахунок збільшення товщини підкату (зниження кількості заворотів, поліпшення планшетності штаб, підвищення точності поперечного профілю штаб по товщині тощо);
- покращення показників роботи неперервного травильного агрегату НТА-4;
- зниження навантаження, а відповідно і витрата електроенергії при прокатуванні штаб на ШСГП 1680 в ЦГПТЛ;
- економія енергетичних ресурсів;
- економія фінансових коштів.

3. У 3 розділі було виконано розрахунок нормальних контактних напружень в осередку деформації при прокатуванні штаб, а саме розроблено алгоритм, блок-схему і комп'ютерну програму розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації при холодному прокатуванні штаби на стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь» за допомогою програмного

комплексу Mathcad Prime 5. Результати розрахунків співпадають з літературними даними. Побудовано епюри і виконано порівняльний аналіз формул, що використовуються для розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації. Показано, що найбільш достовірні результати можуть бути отримані при використанні формул, що враховують зміну вимушеної межі текучості в осередку деформації за параболічним законом.

4. У 4 розділі було розроблено програму для виконання розрахунків із застосуванням сучасного програмного комплексу MathCAD Prime 5. Наведена методика визначення оптимальної продуктивності і техніко-економічних показників сучасних неперервних тонкоштабових станів холодної прокатки. Визначено вплив основних параметрів прокатки на продуктивність стана, а саме, швидкості прокатки, маси рулонів, темпів розгону і гальмування двигунів головного приводу, зниженої швидкості проходження зварних швів, часу допоміжних і заправочних операцій, маси гарячекатаних рулонів перед зварюванням, товщини і ширини штаби, що прокатується. Для станів основних типів визначено граничні швидкості прокатки, перевищення яких призводить до зниження продуктивності стана.

5. У механічній частині виконали розрахунок валків листопрокатних станів на міцність і деформацію в середовищі AutoCAD Mechanical. Використання генераторів компонентів і розрахункових модулів AutoCAD Mechanical 2018 дозволяє автоматизувати багато стандартних проектних завдань, виконувати розрахунки відповідно до міжнародних стандартів DIN або ANSI і значно скоротити час виконання розрахунків на міцність і деформацію валків прокатних станів. Порівняння даних, отриманих в AutoCAD Mechanical 2018, показує їх відповідність з літературними даними, отриманими розрахунковим шляхом. Реалізація алгоритму МСЕ дозволяє враховувати в розрахунках різні властивості матеріалів і різноманітні граничні умови для областей зі складною конфігурацією, наочно представити результати розрахунків. Показано що програмний комплекс AutoCAD Mechanical 2019

може бути використаний при розрахунку валків робочих клітей прокатних станів.

6. В економічній частині магістерської роботи виконано аналіз собівартості продукції прокатного виробництва.

7. У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» виконано аналіз потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища та оцінку факторів виробничого і трудового процесу на робочому місці вальцювальника.



**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Делюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. Москва : Машиностроение, 2005. 272 с.
2. Пеленов А.В. Снижение РКМ за счет изменения технологической цепочки производства холоднокатаной продукции толщиной 0,5 мм. Доклад на 42-й международной научно-технической конференции молодежи ПАО «Запорожсталь», г. Запорожье, 12 ноября 2015 г. Запорожье, ПАО «Запорожсталь», 2015.
3. Николаев В.А. Напряжения, деформации и служба валков в клети кварто: монография, Запорожье : ЗГИА, 2018. – 190 с.
4. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки: учеб. пособие, Москва : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009. – 399 с.
5. Механическое оборудование цехов холодной прокатки / Колл. авт. Под ред. чл. –корр. АН СССР Г.Л. Химича, Москва : Машиностроение, 1972, 536 с.
6. Третьяков А. В. Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки. Москва : Металлургия, 1966. – 256 с.
7. Николаев В.А. Оценка методов расчета нормальных напряжений при прокатке полос. Производство проката. Запорожье : ЗГИА – 2013. - № 9. – С. 20-24.
8. Василев Я.Д., Мінаєв О.А. Теорія поздовжньої прокатки. Підручник, Донецьк : УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
9. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки Москва : Металлургия, 1995. – 368 с.
10. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Теория прокатки: учеб. для студентов вузов, Москва : Теплотехник, 2013. - 306 с.
11. Шестаков Н.А. Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad (решение задач энергетическим методом). Учебное пособие, Москва : МГИУ. – 2008. – 333 с.

12. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. Санкт-Петербург.: БХВ-Петербург. – 2007. – 368 с.
13. Химич Г.Л., Третьяков А.В., Гарбер Э.А., Макарова М.А. Оптимальная производительность станов холодной прокатки: монография. Москва : Металлургия, 1970. 240 с.
14. Химич Г.Л., Цалюк М.Б. Оптимизация режимов холодной прокатки на ЭЦВМ монография, Москва: Металлургия, 1973. 256 с.
15. Грицына Н.И. Проектирование деталей машин с использованием генераторов компонентов и расчетных модулей Autodesk Inventor. Вестник ХНАДУ. – 2015. – Вып. 69. – С. 13 – 18.
16. Боровік П.В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: навч. посіб., Алчевськ : ДонДТУ, 2012. - 170 с.
17. Федорченков А.П. Кимаев А.М. AutoCAD Mechanical. Практическое руководство, Москва : «ТехБук», 2004. – 688 с.
18. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов, Москва : Металлургия, 1985. - 376 с.
19. Целиков А.И. Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката: учебник для ВУЗов, Москва : Металлургия, 1988. – 680 с.
20. Полухин В.П., Николаев В.А., Тылкин М.А. и др. Надежность и долговечность валков холодной прокатки Москва : Металлургия, 1976. - 448 с.
21. Гарбер Э.А. Кожевникова И.А. Теория прокатки: Учеб. для студентов вузов, Череповец : ЧГУ; Москва : Теплотехник, 2013. - 306 с.
22. Проскурович О.В., Бойчук В.А. Комп'ютерні технології економічного аналізу: Навчальний посібник, Львів : Новий Світ-2000, 2012. – 310 с.
23. Положення про службу охорони праці на підприємстві ПАТ «Запоріжсталь» .

## **ДОДАТОК А**

**Публікація за темою кваліфікаційної магістерської роботи**

Науково-дослідна частина  
Наукове товариство студентів,  
аспірантів, докторантів і молодих вчених

**ЗБІРНИК**  
наукових праць студентів,  
аспірантів і молодих вчених

«МОЛОДА НАУКА-2019»

**Том V**

«Секції Криворізького факультету ЗНУ»  
«Секції Інженерного інститут ЗНУ»

Запоріжжя  
2019

|  |    |
|--|----|
| <b>Мотчанова Світлана</b>  |    |
| <i>ПОНЯТТЯ, ХАРАКТЕРИСТИКА І ВИДИ РІШЕНЬ В МЕНЕДЖМЕНТІ</i> .....   | 73 |
| <b>Ходус Олег</b>  |    |
| <i>УПРАЛІННЯ ІНВЕСТИЦІЙНИМИ ПРОЕКТАМИ У ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»...</i>                                      | 75 |
| <b>ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ</b>   |    |
| <b>СЕКЦІЯ «МЕТАЛУРГІЯ»</b>   |    |
| <b>Андрєєва Ксенія</b>   |    |
| <i>РОЗРАХУНОК ВАЛКІВ ПРОКАТНИХ СТАНІВ НА МІЦНІСТЬ І ДЕФОРМАЦІЮ У ПРОГРАМІ AUTOCAD MECHANICAL</i> .....             | 77 |
| <b>Батичко Олена</b>   |    |
| <i>РОЗРАХУНОК НОРМАЛЬНИХ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПРОКАТУВАННІ ШТАБ</i> .....                | 78 |
| <b>Бондаренко Оксана</b>   |    |
| <i>КОНСТРУКТИВНІ МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗУСИЛЛЯ ПРИ РОЗПОДІЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ</i> ..... | 79 |
| <b>Варченко Дмитро</b>   |    |
| <i>ЗАСТОСУВАННЯ ВОГНЕТРИВКИХ ФУТЕРОВОК В МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСАХ</i> .....  | 80 |
| <b>Воденнікова Оксана</b>  |    |
| <i>АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА КОЛІСНИХ СТАЛЕЙ</i> .....                         | 82 |
| <b>Воденнікова Оксана</b>  |    |
| <i>РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЧОРНІЙ МЕТАЛУРГІЇ</i> .....  | 84 |
| <b>Власенко В.В.</b>   |    |
| <i>ПОЗАПІЧНЕ РАФІНУВАННЯ ФЕРОСИЛІЦІЮ ВІД АЛЮМІНІЮ</i> .....  | 86 |
| <b>Груша Артем</b>   |    |
| <i>ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛЕВОГО ЛОМУ В МЕТАЛУРГІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ</i> .....   | 88 |
| <b>Дворецький Володимир</b>  |    |
| <i>АЛГОРИТМ ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ</i> .....  | 90 |
| <b>Детюк Наталія</b>   |    |
| <i>МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЧАСТИНОК ПРИ ОТРИМАННІ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ МЕТОДОМ РОЗПИЛЕННЯ</i> .....               | 91 |
| <b>Іванюк Анна</b>   |    |
| <i>ПРО ВИРОБНИЦТВО І СПОЖИВАННЯ ТИТАНУ</i> .....   | 93 |
| <b>Кідалов Владіслав</b>   |    |
| <i>УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ НА РЕВЕРСИВНОМУ СТАНІ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ 1200</i> .....                           | 94 |
| <b>Кузнєцова Наталія</b>   |    |
| <i>МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ПОЧАТКОВОЇ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ВИТЯГУВАННЯ КОРОБЧАСТИХ ДЕТАЛЕЙ</i> .....                | 95 |
| <b>Лепіна Яна</b>  |    |
| <i>МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ РОЗКРИЛИ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК СКЛАДНОГО КОНТУРУ</i> .....                           | 96 |
| <b>Лисиця Ганна</b>  |    |
| <i>ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАСТИЛ ПРИ ХОЛОДНОМУ ЛИСТОВОМУ ШТАМПУВАННЯ</i> .....                     | 97 |

Основний спосіб розрахунку валу в AutoCAD Mechanical полягає у визначенні контуру і вставці сил і опор. Програма розраховує всі необхідні значення і буде відповідні епюри моментів і деформацій [2].

Використання генераторів компонентів і розрахункових модулів AutoCAD Mechanical дозволяє автоматизувати багато стандартних проектних завдань, виконувати розрахунки відповідно до міжнародних стандартів DIN або ANSI і значно скоротити час виконання розрахунків на міцність і деформацію валків прокатних станів. Порівняння даних, отриманих в AutoCAD Mechanical, показує їх відповідність з літературними даними, отриманими розрахунковим шляхом. Реалізація алгоритму МСЕ (метод скінченних елементів) дозволяє враховувати в розрахунках різні властивості матеріалів і різноманітні граничні умови для областей зі складною конфігурацією, наочно представити результати розрахунків. Показано що програмний комплекс AutoCAD Mechanical 2019 може бути використаний при розрахунку валків робочих клітей прокатних станів.

### Література

1. Боровік, П.В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінченних елементів: навч. посіб. [Текст] / П.В. Боровік. - Алчевськ: ДонДТУ, 2012. - 170 с.
2. Федорченков, А.П. AutoCAD Mechanical. Практическое руководство [Текст] / А.П. Федорченков, А.М. Кимаев. – М.: «ТехБук», 2004. – 688 с. – Библиогр.: с. 688. – ISBN 978-5-49807-774-1.

**Батичко Олена**

магістрант 1 курсу факультету металургії  
Наук. кер.: к.т.н., доц. Проценко В.М.

### **РОЗРАХУНОК НОРМАЛЬНИХ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ПРОКАТУВАННІ ШТАБ**

Метою роботи є розробка алгоритму і комп'ютерної програми розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації при холодному прокатуванні штаб на реверсивному стані 1680 ПАТ «Запоріжсталь» у програмному комплексі Mathcad Prime 5. Іншою метою є порівняльний аналіз формул, що використовуються для розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації. Застосування сучасної комп'ютерної програми обумовлює актуальність та практичну значимість даної роботи як для навчального процесу, так і для науково-дослідної і проектно-конструкторської роботи. Питанню розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації при прокатуванні штаб присвячено значну кількість робіт [1].

Для визначення величини тисків у довільному перетині осередку деформації розроблено алгоритм розрахунку, відображений на відповідній блок-схемі. Осередок деформації розбивається на ряд перетинів (від 0 до k).

У кожному перетині визначається поточна висота штаби  $h$ , яка порівнюється з висотою штаби у нейтральному перетині  $h_n$ . Висота  $h_n$  визначається з умови рівності тисків у цьому перетині з боку зони відставання і випередження. У кожному перетині розраховувалися нормальні контактні напруження  $P_0$  – для зони відставання,  $P_1$  – для зони випередження.

Результати розрахунків у програмному комплексі Mathcad Prime 5 [2] співпадають з літературними даними. Побудовано епюри і виконано порівняльний аналіз формул, що використовуються для розрахунку нормальних контактних напружень в осередку деформації. Встановлено, що найбільш точний розрахунок тиску металу на валки при прокатуванні можливий лише у тому випадку, коли формули, що застосовуються, враховують зміну вимушеної межі текучості в осередку деформації за прямолінійним або параболічним законами. Прямолінійний закон може бути використаний при невеликих обтисненнях. В інших випадках слід використовувати формули, що враховують зміну вимушеної межі текучості за параболічним законом.

### Література

1. Никитин, Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки: учеб. пособие [Текст] / Г.С. Никитин. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2009. – 399 с. – ISBN 978-5-7038-3401-5.
2. Шестаков, Н.А. Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad (решение задач энергетическим методом). Учебное пособие [Текст] / Н.А. Шестаков. – М.: МГИУ. – 2008. – 333 с. – ISBN 978-5-2760-1519-4.

**Бондаренко Оксана**

магістрант 1 курсу факультету металургії  
Наук. кер.- д.т.н., проф. Явтушенко О.В.

## КОНСТРУКТИВНІ МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗУСИЛЛЯ ПРИ РОЗПОДІЛЬНИХ ОПЕРАЦІЯХ ЛИСТОВОГО ШТАМПУВАННЯ

Розділові операції листового штампування характеризуються несприятливим силовим режимом пластичного деформування. При виконанні операції поділу інструментом з плоскими ріжучими крайками процес поділу металу починається одночасно по всьому периметру контуру, в результаті чого технологічне зусилля зростає до максимального значення, а потім різко знижується майже до нуля.

В результаті відбувається різке динамічне порушення технологічної машини - під дією накопиченої потенційної енергії рухомі частини робочого органу та інструменту (штампа) набувають значне прискорення і відбувається перерозподіл сил в головному виконавчому механізмі. Таке динамічне порушення системи призводить до перерозподілу напрямів і величини діючих