

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

**Кваліфікаційна робота / проект**

Другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему **Математичне моделювання площинності і механічних  
властивостей холоднокатаного тонкоштабового прокату**

Виконав: студент II курсу, групи 8.1361-омт  
спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Обробка металів тиском

(код і назва освітньої програми)

О.В. Федорченко

(ініціали та прізвище)

Керівник

доц. каф. МТЕТБ, с.н.с., к.т.н. В.М. Проценко

Рецензент

доц. каф. МТЕТБ, доц, к.т.н. А.В. Явтушенко

Запоріжжя – 2022 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Запорізький національний університет**  
( повне найменування вищого навчального закладу )

Інженерний навчально – науковий інститут ім. Ю.М. Потебні

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки  
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень  
Спеціальність 136 «Металургія»  
(код та назва)  
Освітньо-професійна програма Обробка металів тиском  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТЕТБ

Ю.О. Белоконь

“ 08 ” 09 2022 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ / ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Федорченко Олені В'ячеславівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) **Математичне моделювання площинності і механічних властивостей холоднокатаного тонкоштабового прокату**

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “02” 06. 22 р. № 597-с

2. Строк подання студентом роботи 08 грудня 2022 року

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Реферат. Вступ. Загальна частина. Дослідницько-розрахункова частина. Технологічна частина. Механічна частина. Заходи з поліпшення умов праці при виробництві холоднокатаних штаб.

Мета кваліфікаційної роботи – математичне моделювання площинності і механічних властивостей холоднокатаного тонкоштабового прокату для побудови ефективних автоматизованих систем управління якістю продукції;

підвищення площинності штаб при прокатуванні шляхом застосування валків з регулярним мікрорельєфом поверхні.

Визначити основні тенденції розвитку і удосконалення технології виробництва штаб. Розробити технічні рішення щодо підвищення якості продукції і зменшення енерговитрат. Виконати математичне моделювання площинності і механічних властивостей холоднокатаного тонкоштабового прокату. Виконати розрахунки вигину валків при прокатуванні, розрахунки валків клітині кварто на міцність і деформацію. Проаналізувати потенційно небезпечні виробничі фактори і розробити заходи щодо захисту від них.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Схеми сучасних станів для холодної прокатування штаб, креслення основних видів клітині кварто, технологічна схема ЦХП-1, вигин валків в процесі прокатування, схеми до розрахунку валків кліті кварто на міцність і деформацію, блок-схему розрахунків контактних напружень.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Вступ, реферат, 1–5, висновки, перелік літератури	Проценко В.М., доц. каф. МТЕТБ	

7. Дата видачі завдання 08.09.2022 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат, вступ, загальна частина.	12.09.22 – 13.10.22	
2.	Дослідницько-розрахункова і технологічна частини.	17.10.22 – 18.11.22	
3.	Механічна частина, охорона праці, висновки, оформлення ПЗ і креслень, підготовка доповіді і презентації.	21.11.22 – 09.12.22	

Студент

(підпис)

**Федорченко О.В.**

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

**Проценко В.М.**

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено  
Нормоконтролер

(підпис)

**Явтушенко А.В.**

(прізвище та ініціали)

## Реферат

Пояснювальна записка магістерської роботи містить: 101 с., 45 рис., 23 табл.; використано літературних джерела 21.

Об'єкт дослідження – неперервний стан холодного прокатування 1680 металургійного комбінату «Запоріжсталь» та математичне моделювання площинності і механічних властивостей прокату, що випускається.

Мета роботи – математичне моделювання площинності і механічних властивостей холоднокатаного тонкоштабового прокату для побудови ефективних автоматизованих систем управління якістю продукції; підвищення площинності штаб при прокатуванні шляхом застосування валків з регулярним мікрорельєфом поверхні.

Методи розрахунків – стандартні методи розрахунків, які використовуються в прокатному виробництві. Розрахунки і комп'ютерне моделювання у системі САПР AutoCAD Mechanical 2020, використання комп'ютерних програм Excel 2019, Mathcad Prime 8.

Отримані результати і їх новизна – наведено математичні моделі процесів формування характеристик неплщинності тонкоштабового прокату. Задача математичного моделювання вирішувалась на основі логічно пов'язаних послідовних математичних моделей, за допомогою яких можна кількісно оцінити ступінь зміни показників, які прямо або опосередковано характеризують площинність готового прокату на агрегатах, що вносять основний вклад у ці зміни. Встановлено, що поверхня валків з регулярним мікрорельєфом забезпечує істотне зниження коефіцієнту тертя і знос валків, підвищення якості штаби.

Отримані результати рекомендуються для впровадження на неперервному стані холодного прокатування комбінату «Запоріжсталь» з метою підвищення продуктивності і техніко – економічних показників виробництва.

ХОЛОДНА ПРОКАТУВАННЯ, НАПРУЖЕННЯ, ДЕФОРМАЦІЯ,  
СТАН, КЛІТИНА, ПРОКАТНІ ВАЛКИ, МОДЕЛЮВАННЯ,  
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## ЗМІСТ

	с.
ВСТУП .....	7
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА .....	9
1.1 Технологічний процес прокатування штаб в умовах ЦХП-1 комбінату «Запоріжсталь» .....	9
1.2 Опис конструкцій і роботи основного устаткування ЦХП-1 .....	12
1.3 Аналіз параметрів режиму деформації на НСХП 1680 .....	19
1.4 Аналіз вузьких місць та заходи щодо реконструкції .....	21
1.5 Стани нескінченного прокатування .....	26
1.6 Новітні досягнення в технології прокатного виробництва .....	30
2 ДОСЛІДНИЦЬКО - РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА .....	40
2.1 Дослідження і розрахунок енергосилових параметрів при холодному прокатуванні тонких штаб .....	41
2.1.1 Розрахунок контактних напружень .....	41
2.1.2 Осередок деформації .....	46
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА: МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОЩИННОСТІ І МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХОЛОДНОКАТАНОГО ТОНКОШТАБОВОГО ПРОКАТУ .....	53
3.1 Математична модель для неперервного стану 1680 .....	53
3.2 Математична модель прогнозування нерівномірності механічних властивостей в металі .....	67
4 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА .....	72
4.1 Розрахунок валків листопрокатних станів на міцність і деформацію в середовищі AutoCAD Mechanical .....	72
4.1.1 Вступ .....	72
4.1.2 Постановка задачі .....	73
4.1.3 Методика дослідження .....	74
4.1.4 Результати досліджень .....	81

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА .....	90
5.1 Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища .....	92
ВИСНОВКИ .....	93
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	96
Додаток А - Публікація за темою кваліфікаційної магістерської роботи .....	98

## ВСТУП

Збільшення обсягів виробництва і необхідність підвищення якості тонкоштабового холоднокатаного прокату вимагають удосконалення існуючих і створення нових високопродуктивних та економічних станів холодної прокатування .

Найголовнішими параметрами широкоштабового стану холодної прокатування є маса рулонів і швидкість прокатування , а також рівень автоматизації та механізації процесу прокатування [1, 2].

Для побудови автоматизованих систем управління якістю (АСУЯ) необхідно вирішення комплексу задач, що включають дослідження процесів формування вектору показників якості і техніко-економічних показників, розробку на основі результатів досліджень математичного, інформаційного і програмного забезпечення систем, у свою чергу необхідних для правильного прийняття рішень при управлінні якістю готової продукції металургійних підприємств.

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

Тип прокатного стану і схема технологічного процесу, як правило, визначаються заданою продуктивністю і сортаментом, а швидкість прокатування і маса рулона вибирається звичайно на основі приблизних розрахунків. Потім за допомогою економічного розрахунку визначають ефективність вибраних вихідних даних. Цей звичайний шлях вибору часто буває недостатньо об'єктивним, оскільки не може враховуватись складна залежність і взаємодія усіх параметрів прокатного стану і процесу прокатного виробництва. Тому обрані дані не забезпечують отримання максимальної продуктивності і найкращих техніко-економічних показників роботи устаткування.

Для підвищення якості 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 устаткування. У всьому світі розповсюдилися такі технології як “литво-прокатування”, SVC - неперервне регулювання товщини листа в процесі прокатування, нескінченне прокатування.

Аналіз численних прикладів модернізації прокатного устаткування, наведених в літературі, показує, що модернізація не в змозі кардинально змінити ситуацію в боротьбі за якість продукції. Причини цього закладені в неможливості зміни традиційної схеми прокатного стана, який має істотні конструктивні недоліки.

Сучасна прокатна клітина, наприклад, кварто, складається із станини, двох робочих валків, двох опорних валків, натискних пристроїв і механізмів протизгинання робочих і опорних валків. У такій клітині зовнішні зусилля, що створюють сили прокатування, прикладаються до шийок валків, тобто на їх кінцях. З боку штаби на валки діють реактивні сили, що викликають в них великі згинальні моменти. В результаті у валках виникає небезпечні напруги, які сприяють виникненню тріщин в робочому шарі і його руйнуванню.

В даний час до продукції станів холодної прокатування висуваються жорсткі вимоги, пов'язані з необхідністю підвищення її конкурентоздатності на світовому ринку, потреби якого в останні роки істотно змінилися. Основним критерієм, що визначає конкурентоздатність продукції, є якість, яка забезпечується за рахунок мінімізації неплочинності і різнотовщинності штаби.

Якість профіля штаби (плочинність і різнотовщинність) формується в основному під час гарячої прокатування. Холодне прокатування мало змінює величину поперечної різнотовщинності, але робить істотний вплив на плочинність штаби, і в цьому питанні важлива роль належить раціональній вихідній профілізації валків [1, 2].

Мета роботи – математичне моделювання плочинності і механічних властивостей холоднокатаного тонкоштабового прокату для побудови ефективних автоматизованих систем управління якістю продукції; підвищення плочинності штаб при прокатуванні шляхом застосування валків з регулярним мікрорельєфом поверхні.



## **1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА**

### **1.1 Технологічний процес прокатування штаб в умовах ЦХП-1 КОМБІНАТУ «Запоріжсталь»**

Неперервний стан холодної прокатування (НСХП) 1680 призначений для прокатування листа товщиною 0,6.-2,2 мм, швидкість прокатування - до 11 м/с, довжина бочки валків 1680 мм, діаметр робочих і опорних валків 520 і 1430 мм. Робочі валки приводяться від електродвигуна потужністю 3200 кВт через шестеренну клітину. У якості підкату використовується гарячекатана штаба товщиною 2,2...3,7 мм з масою рулона до 16 т. Сумарне обтиснення на цих станах досягає 85 %. Цей стан є основним постачальником холоднокатаної листової сталі комбінату «Запоріжсталь».

Після подачі штаби в першу клітину прокатування ведеться на постійній швидкості, поки передній кінець штаби пройде всі клітини і на моталці утворюється 2...3 витка штаби. Потім швидкість підвищується, і рулон прокочується з постійною робочою швидкістю. Перед зварним швом швидкість прокатування сповільнюється. Потім стан розганяється до робочої швидкості, і далі все повторюється. При підході заднього кінця штаби швидкість прокатування зменшується з робочої до заправної, після чого задній кінець прокочується з постійною швидкістю. Після паузи починається прокатування рулона.

Значна частина штаби прокочується зі змінною швидкістю, що впливає на параметри прокатування : натягнення штаби, силу прокатування , товщину штаби, коефіцієнт тертя, обтиснення тощо.

Зварні шви прокочуються на вповільненій швидкості, через зміну товщини і нестабільність механічних властивостей швів. Якщо при проходженні зварених швів між валками швидкість прокатування не знижувати, то це веде до сильних штовхань і може відбуватися розрив штаби [3].

Щоб не знижувати швидкість прокатування при проходженні зварених швів, потрібно забезпечити однакові механічні властивості металу шва і металу штаби і мінімальну різнотовщинність підкату. Вирівнювання меж плинності металу штаби і матеріалу шва може бути досягнуто зменшенням обтиснення за швом за рахунок зняття ґрату на мінус.

Для зміни швидкості валків стану застосовується двигуни, що забезпечують швидкий розгін і зупинення .

При багаторазовому обтисненні штаб відбувається їх значний розігрів, тому виникає необхідність примусового охолодження штаби і валків. Для охолодження використовують змащення, яке при холодному прокатуванні знижує коефіцієнт тертя між штабою і валками до 0,01...0,05, завдяки чому зменшуються сила прокатування і опір деформації. Прокатування зі змащенням забезпечує більше обтиснення, зменшує зношування валків, знижує витрати енергії, і підвищує якість прокатоної сталі.

Змащення повинно добре прилипати до валків, забезпечуючи рівномірну плівку між штабою і валками, і під час прокатування не повинне видавлюватися. Змащення утворить розділяючий ковзний шар між валками і штабою що прокочується . Змащення також повинно легко видалятися з поверхні листовий сталі після прокатування . Більш успішні вважаються емульсії на основі мінеральних мастил. Емульсія подається по обидва боки робочої клітини в місця контакту штаби і валків та на метал що прокочується . Для готування емульсій і подачі її на валки робочої клітини існує спеціальне устаткування. На стан емульсія подається за допомогою насосів. Для очищення емульсії використовуються магнітні сепаратори і фільтри. Для охолодження емульсії використовуються охолоджувачі. Ефективність змащення залежить не тільки від правильного вибору їхнього складу, але і від способу подачі на валки і штабу [3].

Холодне прокатування здійснюється зі значним натяжінням , що знижує силу прокатування , стабілізує процес прокатування і служить у якості регулюючого фактору товщини штаби.

Звичайно на штабу в першій клітині діє тільки переднє натягнення, а в останній і проміжній клітинах діє переднє і заднє натягнення. Між клітьми натягнення створюється за рахунок неузгодженості швидкостей, а передній натяг в останній клітині здійснюється моталкою.

Особливість холодного прокатування – це виникнення зміцнення, в результаті чого різко зростають межа міцності, межа текучості, і зменшується відносне подовження.

Холодна деформація сталі супроводжується значним виділенням тепла, тому температура штаби досягає 160...260°C [3].

Натяжіння істотно впливає на товщину штаби: зі збільшенням натягу товщина штаби зменшується. При стійкому процесі прокочування для забезпечення високої точності розмірів штаби по довжині, доцільно підтримувати натяжіння у межах 0,3 -0,5  $\sigma_T$ .

Механічні властивості підкату по довжині штаби розподіляються нерівномірно. Через неоднорідність хімічного складу в слябах, у гарячекатаних рулонах виникає додаткова неоднорідність через різні режими охолодження середини штаби і кінців штаби. Кінці штаби остивають швидше, в результаті межа міцності металу на початку і наприкінці рулона вище, ніж у середині рулону на 12...20 %.

Зміна товщини і натяжіння штаби по фазі збігаються зі зміною зазору між валками через биття валків.

Швидкість прокатування впливає на поздовжню різнотовщинність через границю текучості матеріалу, що прокочується, коефіцієнт тертя і внаслідок зміни товщини масляної плівки.

Зі збільшенням швидкості прокатування підвищується температура сталі внаслідок теплового ефекту пластичної деформації. Збільшення температури сталі призводить до зниження межі плинності і до зменшення сили прокатування і товщини штаби.

Важливим завданням прокатування є одержання необхідних механічних властивостей тому, що структура і здатність штампуватися листової сталі

визначаються режимом холодного прокатування . При критичному ступені деформації (наприклад, 8...12% для сталі 08 кп) при рекристалізації утворюються крупні зерна. При малій ступені деформації зерна гарячекатаної сталі майже не дробляться, і далі ріст зерна не спостерігається, тому що відсутня рекристалізація. При збільшенні ступені деформації зерна фериту дробляться і витягуються в напрямку прокатування , відбувається розрив міжзеренної речовини, границі зерен майже зникають, цементит також витягується уздовж прокатування [4].

Межа плинності і межа міцності відпаленої холоднокатаної сталі зростають зі збільшенням ступеня деформування. При холодному прокатуванні сумарне обтиснення становить 55...85%, а одержання необхідних механічних властивостей забезпечується підбором режиму відпалу і оптимального хімічного складу сталі.

## **1.2 Опис конструкцій і роботи основного обладнання ЦХП-1**

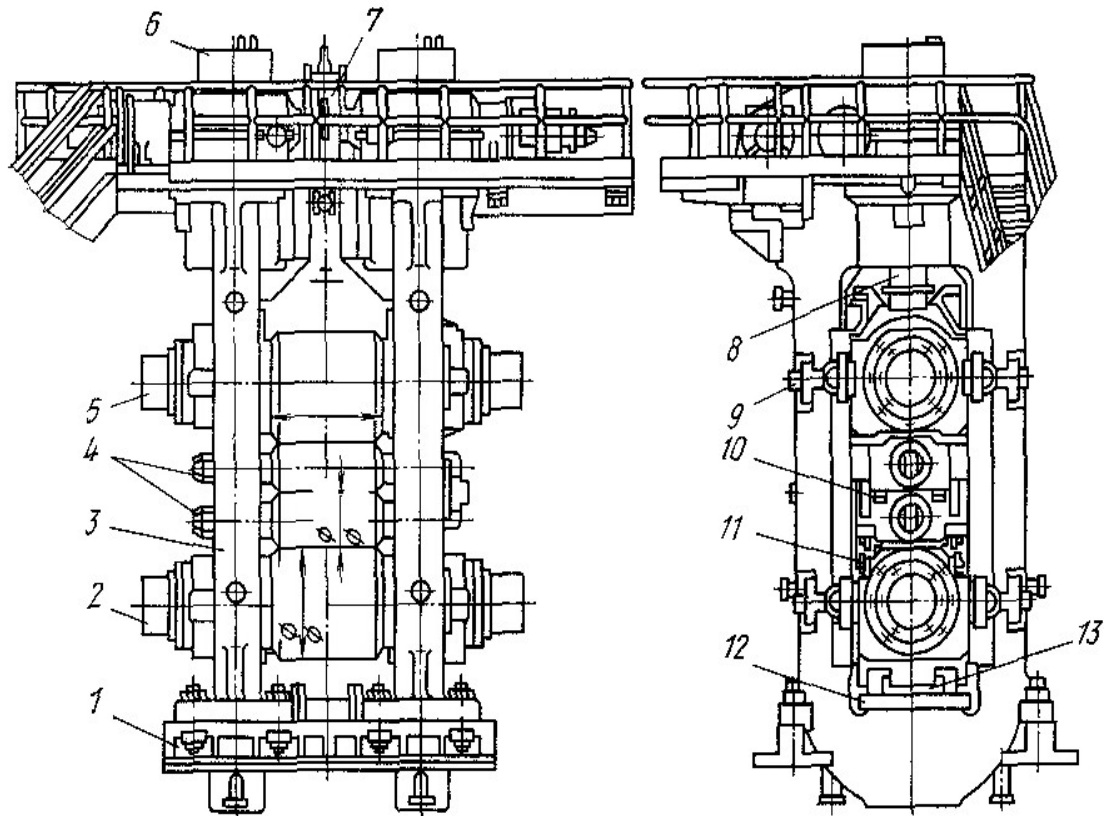
У прокатному відділенні відбувається прокатування в клітках закритого типу з робочими валками діаметром 460 - 520 мм, і опорними 1220 - 1410 мм. На рис 1.1 зображена прокатна клітина закритого типу стану 1680.

При зміні повного комплексу опорних і робочих валків застосовується гідравлічний пристрій, що врівноважує.

На рис 1.2 показаний загальний вид пристрою для гідравлічного врівноважування верхніх опорного і робочого валків стану 1680. Врівноважування опорних і робочих валків здійснюється за допомогою гідравлічних плунжерів 3, які розташовані між подушками робочих і опорних валків.

Шестеренна клітина, представлена на рис 1.3 і призначена для поділу крутного моменту на опорні валки. Шестеренні клітини роблять відкритими (зі знімальною кришкою). Вони складаються з наступних основних елементів: кришки, станини; подушок з підшипниками, шестерень.

Станини і кришки відливають із високоміцного або модифікованого чавуну (марок СЧ32-52, ВЧ45-5); підшипники – роликові конічні або бабітові; шестерні виготовляють із кованої легованої сталі марок 40ХН, зуби піддають гартуванню з поверхні [5].



1 – плитовина; 2 – нижній опорний валок; 3 – станина; 4 – робочі валки; 5 – верхній опорний валок; 6 – натискний пристрій; 7 – механізм врівноваження верхнього опорного валка; 8 – натискний гвинт; 9 – гідрозаслонка; 10 – гідроциліндр; 11 – направляючі бруси для зміни робочих валків; 12 – полоз'я для заміни опорних валків

**Рисунок 1.1** – Прокатна клітина закритого типу НСХП 1680 комбінату «Запоріжсталь»

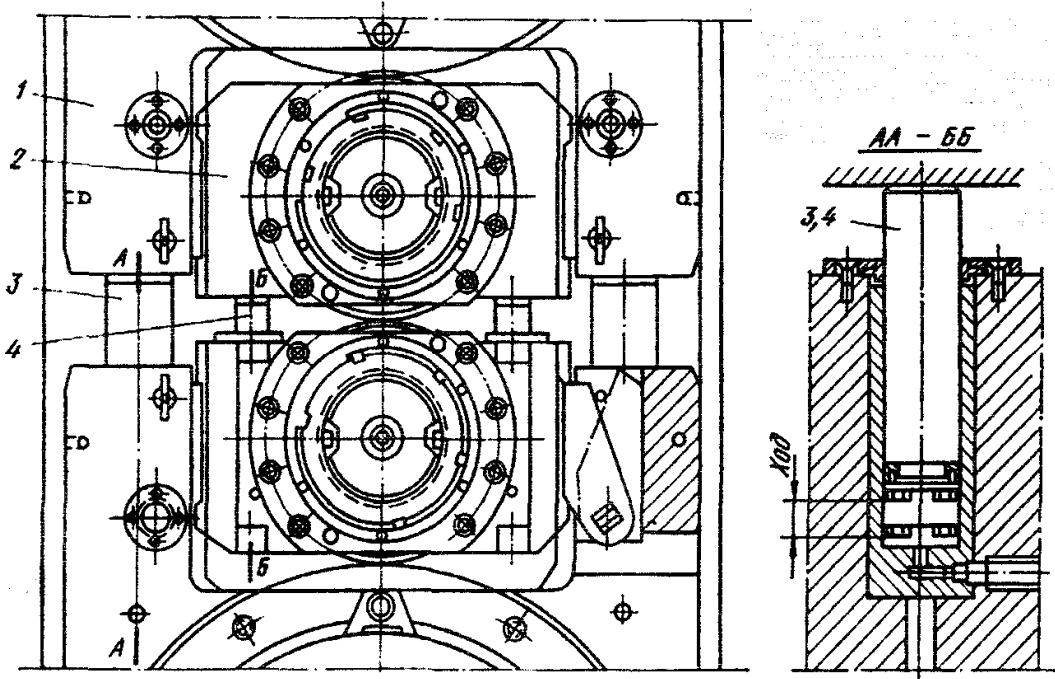


Рисунок 1.2 – Гідравлічне урівноважування верхнього опорного і робочого валків чотирьохвалкової клітини стану 1680

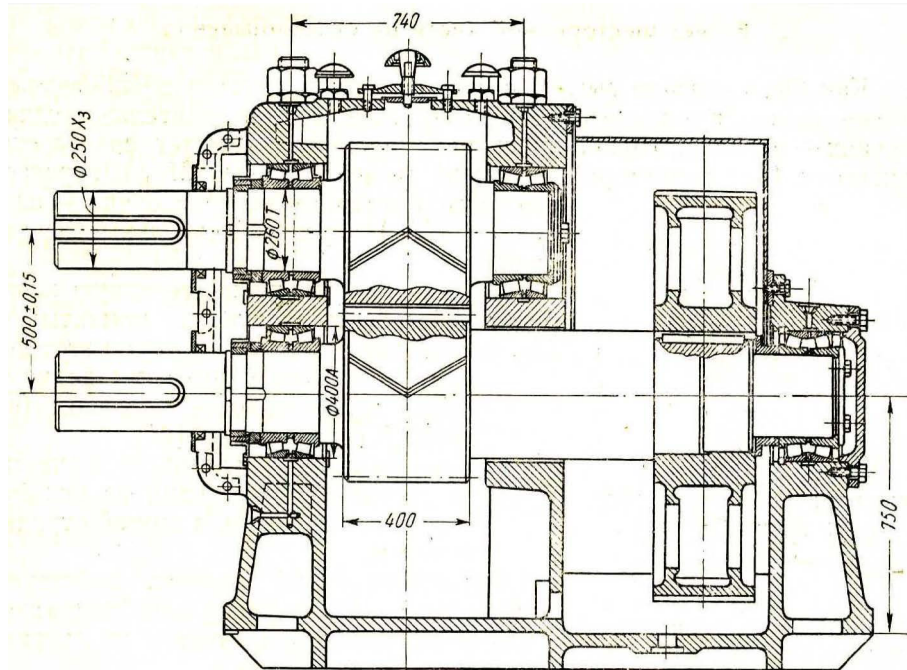
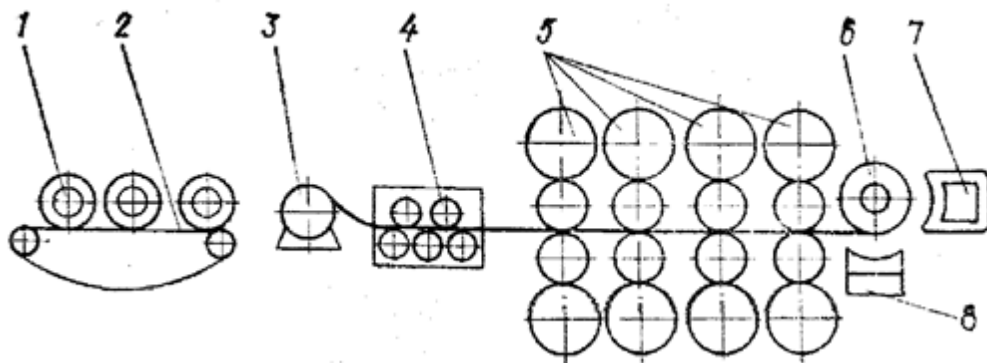


Рисунок 1.3 – Шестеренна клітина для приводу валків чотиривалкової клітини стану 1680 конструкції НКМЗ

На рис. 1.4 зображена схема чотирьохклітинного неперервного стану холодної прокатування 1680.



1 – травлені рулони, 2 – транспортер, 3 – розмотувач, 4 – правильна машина, 5 – валки робочих клітей, 6 – моталка, 7, 8 – колиска знімача

**Рисунок 1.4** – Схема чотирьохклітинного неперервного стану холодної прокатування 1680 комбінату «Запоріжсталь»

Травлені рулони 1 краном устанавлюються на ланцюговий транспортер 2, і передаються на розмотувач 3. Кінець штаби відгинається і задається в тягнучі ролики правильної машини 4. Потім тягнучими роликами штаба задається у валки робочих клітей 5 (із заправною швидкістю).

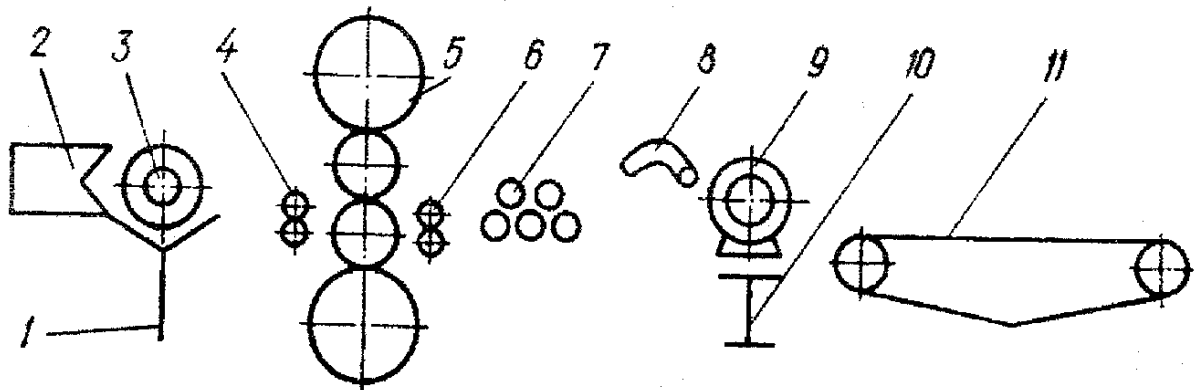
Штаба, пройшовши робочі валки 4-ї клітини, задається в барабан моталки 6. Після намотування 4.-5 витків створюється натяжіння між 4 кліттю і моталкою, стан розганяється до робочої швидкості.

Після прокатування рулона, коли на головках розмотувача залишається два-три витки штаби, швидкість стану вповільнюється до заправної, після чого кінець штаби пропускають через робочі клітини. На барабані моталки кінець штаби фіксується колискою знімача 8, і рулон убирається на пакувальне сковзало, потім по ланцюговому конвеєрі рулони транспортуються у відділення термічної обробки [6].

На рис. 1.5 представлена схема одноклітинного дресирувального стану 1700. Рулони подаються ланцюговим транспортером 11 з відділення відпалу. З ланцюгового транспортеру рулон кантується і механізмом подачі 10

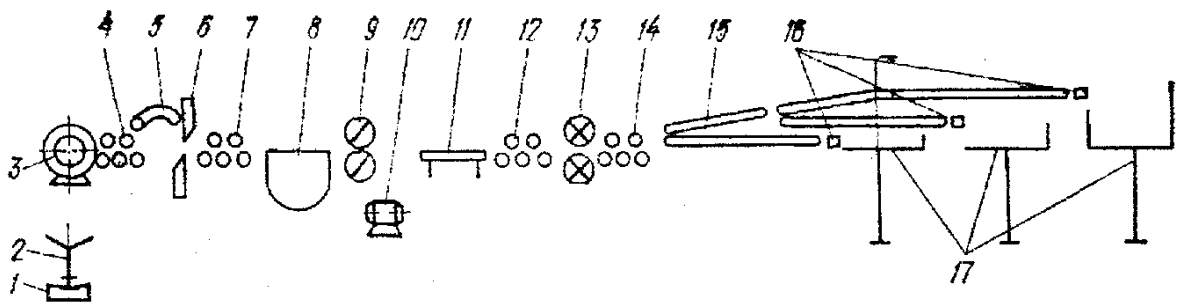
подається на розмотувач 9. Передній кінець рулона відгинається відгибачем 8 і задається на заправній швидкості в правильну машину 7, а потім у натяжний пристрій 6. Пройшовши валки робочої клітини 5, передній кінець штаби проходить задній натяжний пристрій 4 і намотується на барабан моталки 3 за допомогою захлестувача 2.

На рис. 1.6 представлена схема агрегата поперечного різання, призначеного для порізу штаби з вуглецевих сталей товщиною 0,5...2,2 мм, шириною 800.-1500 мм на листи довжиною 1.-6 м зі швидкістю 1,6...5 м/с.



1, 3 – барабан моталки, 2 – захлестувач, 4 – натяжний пристрій, 5 – валки, 6 – натяжний пристрій, 7 – правильна машина, 8 – відгибач, 9 – розмотувач, 10 – механізм подачі, 11 – транспортер

**Рисунок 1.5** – Схема одноклітинного дресирувального стану 1700



**Рисунок 1.6** – Схема агрегата поперечного розрізання холоднокатаних штаб

Рулони встановлюються на конвеєр 1 за допомогою крана. Черговий рулон за допомогою пересувного гідравлічного стола 2 насувається на консольний барабан розмотувача 3; останній автоматично розклинюється

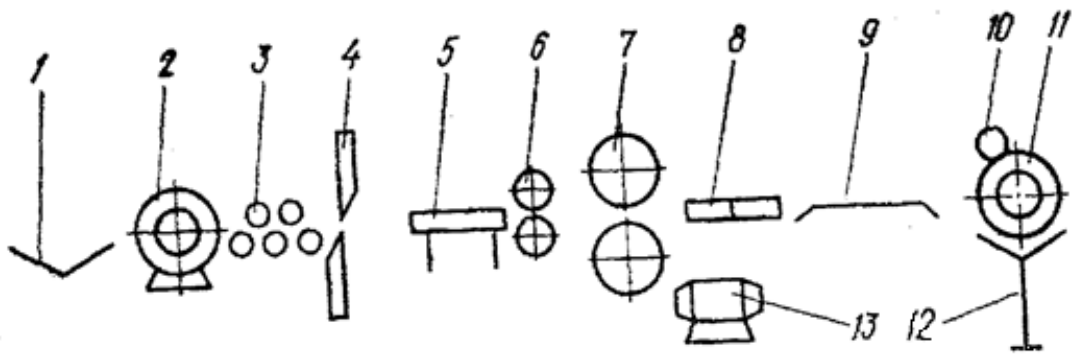


(збільшується його діаметр) і повертається в положення, необхідне для відгинання переднього кінця штаби магнітним відгибачем 6. При цьому ролик 4 опускається. Передній нерівний кінець штаби (довжиною 1 - 2 м) відрізається гідравлічними гільйотинними ножицями 6, подається роликами 7 на похилий стіл 8 і скидається в бічний короб для обрізання.

Бічні крайки штаби відрізаються дисковими ножицями 9 і змотуються в тугі мотки кромко моталкою 10. Остаточне виправлення штаби здійснюється другою правильною машиною 12, після чого штаба розрізається на листи мірної довжини летючими барабанными ножицями 13. Петлеві столи 8 і 11 призначаються для забезпечення можливості вирівнювання швидкості дискових ножиць зі швидкістю обох правильних машин.

Пакетувальний пристрій 17 складається із трьох секцій: перша – для бракованих листів, інші дві для придатних. Листи направляються на пакетувальні столи розподільним стрічковим транспортером 15. Над нижньою областю цього транспортера встановлені перемикаючі електромагніти, перемикання яких здійснюється від імпульсу приладів 11 контролю якості поверхні штаби, розташованих перед другою правильною машиною. Перед надходженням на пакетувальні столи придатні листи промаслюються в пристроях 16 [6].

На рис. 1.7 представлена схема агрегата поздовжнього різання холоднокатаних штаб. Цей агрегат призначений для обрізки бічних кромки рулонної штаби і різання її на вузькі стрічки. Параметри вихідних рулонів: маса до 35 т, товщина штаби 0,5 - 2,2 мм, ширина 750 - 1500 мм. Готові вузькі рулони: маса до 10 т, зовнішній діаметр до 1550 мм, внутрішній діаметр 600 мм, ширина 85 мм і більше.



**Рисунок 1.7** – Схема агрегату поздовжньої різки холоднокатаних штаб

Вихідний рулон зі стелажу 1 установлюється на барабан розмотувача 2, кінець штаби відгинається магнітним вигибачем 3 і обрізається ножицями 4, подається в пристрій, що промаслює 5. Штаба проходить через контрольномаркувальний стіл 6 і дисковими ножицями 7 розрізається на вузькі стрічки; при заправленні агрегату візок машини 8 під'їжджає до дискових ножиць і схоплює кінець стрічок, затискаючи їх між своїми роликами, безпосередньо при виході стрічок з ножів ножиць. Потім при одночасному обертанні ножів ножиць візок по напрямних переміщається до моталки 11, перед якою спеціальним пристроєм стрічки розводяться друг від друга й задаються в щілину барабана. Формування рулону стрічки здійснюється на моталці за допомогою притискного ролика, що качає, 10. Рулони стрічок за допомогою пересувного піднімального стола 12 передаються на поворотний стіл і далі краном на упаковку. При різанні стрічок на ножицях одночасно здійснюється обрізка бічних кромок, які змотуються на кромкомоталці 18 [5].

Барабанні ножиці є однією з основних машин для різання металу. Вони набули широкого застосування для холодного різання сталевих штаб товщиною до 4 мм. Принцип і пристрій роботи полягають у наступному. На двох барабанах за їх утворюючим радіально закріплені ножі (по одному або по трьох на кожному барабані). Штаба рухається беззупинно і подається до ножиць роликами (або валками останньої клітини неперервного стану) з постійною швидкістю. При зустрічі верхнього і нижнього ножів відбувається різання штаби. Для створення розриву між відрізними шматками штаби

швидкість вихідного ролгангу повинна бути більше швидкості штаби перед ножицями.

### **1.3 Аналіз параметрів режиму деформації на НСХП 1680**

Створення необхідних умов для ведення ідеального процесу холодного прокатування на діючих станах пов'язане з труднощами організаційного і технологічного характеру. Ці труднощі полягають в прийнятих на кожному підприємстві режимах обтиснень, технологічних схемах, що склалися, традиціях і навичок персоналу. Тому мета даного дослідження бачиться не тільки і не стільки у визначенні умов для ведення ідеального процесу холодного прокатування, скільки у виявленні оптимальних умов ведення процесу холодного прокатування як з енергетично сприятливої сторони, так і з боку отримання високої якості прокату (з низькою подовжньою і поперечною різнотовщинністю, хорошою планшетністю, високою точністю).

#### *Вибір обтиснення*

Для холоднокатаних листів висуваються високі вимоги по планшетності і різнотовщинності, а також ряд інших вимог до якості листа, які виступають обмежуючим чинником при виборі режимів обтиснень.

#### *Обтиснення в першій клітині*

При прокатуванні в першій клітині задній натяг практично відсутній, унаслідок чого штаба при великих обтисненнях погано центрується і має тенденцію зміщуватися убік від лінії прокатування [3]. Ця обставина обмежує обтиснення в першій клітині. Крім того обтискання в першій клітині обмежується тим, що гарячекатаний підкат має істотну різнотовщинність (першу клітину необхідно використовувати для регулювання товщини штаби за допомогою САРТ і тому вона повинна мати резервну потужність для забезпечення належного діапазону регулювання) [7].

Важливим доводом в захист знижених обтиснень в перших клітках

неперервного стану є те, що ефект самовирівнювання різнотовщинності помітно проявляється лише тоді, коли деформаційне зміцнення металу порівняно невелике. Отже зниження обтискань в перших клітках сприяє самовирівнюванню подовжньої різнотовщинності.

#### *Обтиснення в останній клітині стану*

При виборі величини обтиснення в останній клітині неперервного стану враховують, що дуже велике обтиснення утрудняє надходження мастила в зону деформації, внаслідок чого погіршується якість поверхні. Іноді йдуть на збільшення обтиснення в останній клітині з тим, щоб мати між останньою і передостанньою клітками підвищену товщину штаби [4]. Це зменшує вірогідність обриву штаби при натяганні. Завдяки значній деформації в останній клітині температура штаби зростає, і при змотуванні штаби в рулон складає близько 250 °С. Це сприятливо позначається на якості профілю прокатоної штаби, оскільки відбувається штаби розтягуванням при підвищеній температурі.

Обтиснення в останній клітині не може бути малим також тому, що з його величиною пов'язана якість регулювання товщини штаби на виході стану. Для умов роботи чотириклітинного стану 1700 Маріупольського меткомбінату при прокатуванні сталі з 2,0 на 0,5 мм обтиснення в четвертій клітині складає 23%. При 20%-ній допустимій зміні натягнення штаби вальцювальник зможе відпрацювати відносну різнотовщинність штаби.

#### *Вибір натягнення штаби*

Коливання обтиснень в першій клітині неперервного стану холодного прокатування (до 10 – 15 %), викликані подовжньою різнотовщинністю гарячекатаних штаб і роботою грубого регулятора товщини здійснюють істотний вплив на профіль і форму прокатаних штаб і весь процес прокатування .

Одна і та ж нерівномірність деформації при прокатуванні в області коробу призводить до меншого в 1,2...1,4 рази відхилення штаби від плоского

стану, чим при прокатуванні хвилястої штаби.

Переднє натягнення діє на форму коробоватої штаби ефективніше, ніж на хвилясту штабу. У зв'язку з цим, зважаючи на специфіку роботи перших клітей і наявність достатнього запасу пластичності металу, розрахунок режиму обтиснень і профілізацій необхідно проводити з урахуванням прокатування в них штаб з деякою коробоватістю

Переднє натягнення найбільш ефективно впливає на профіль і форму штаби в межах до 40 - 50 МПа. Подальше збільшення натягнення з метою поліпшення їх площинності недоцільне [8].

#### *Температурні умови прокатування*

Процес холодного прокатування виявляється найбільш стабільним при температурі валків 55 – 60 °С, яка забезпечується при температурі емульсії 45 – 50°С і її витраті 420 – 630 м<sup>3</sup>/год. При цьому гаряча емульсія має хорошу здатність відмивати. При охолодженні емульсією валків на штабі менше відкладається жирів, що призводить до утворення сажі при відпалі. Прокатування ж на емульсії з температурою вище 55 °С викликає інтенсивне випаровування, яке перешкоджає візуальному спостереженню за профілем штаб, що прокатуються.

В даний час на стані холодної прокатування комбінату «Запоріжсталь» валки охолоджуються емульсією з температурою 45 – 50 °С. Це дозволило збільшити продуктивність стану і на 0,5 % кількість металу, відсортованого по дефектам площинності.

### **1.4 Аналіз вузьких місць та заходи щодо реконструкції**

Неперервний чотириклітинний стан 1680 комбінату «Запоріжсталь» є високомеханізованим станом з високим ступенем автоматизації. Проте стан має ряд недоліків, які заважають підвищенню якості прокату і обсягів виробництва.

1. Існуюча емульсійна система на стані малопотужна, витрата емульсії 250 м<sup>3</sup>/год (на всі клітини). Через це погіршується якість продукції, а також

відбувається перегрів валків і не забезпечується проектна швидкість прокатування 11 м/с.

Добавка в мінеральні мастила 20 - 40 % жирових присадок, а також застосування, як змащувачів, прокатних емульсолів дозволяє забезпечити надійний захист штаби від дефектів при змотуванні в рулон і зменшити енерговитрати на прокатку. Використання емульсолу водорозчинного типу дозволяє підтримувати постійною концентрацію масляної фази в прокатній емульсії.

Основною причиною утворення сажі на поверхні прокату є залишки мастил. Для зменшення сажоутворення при відпалі ефективно застосування водорозчинних промаслюючих складів, якісне видалення емульсії з поверхні прокату, прокатку шліфованими валками.

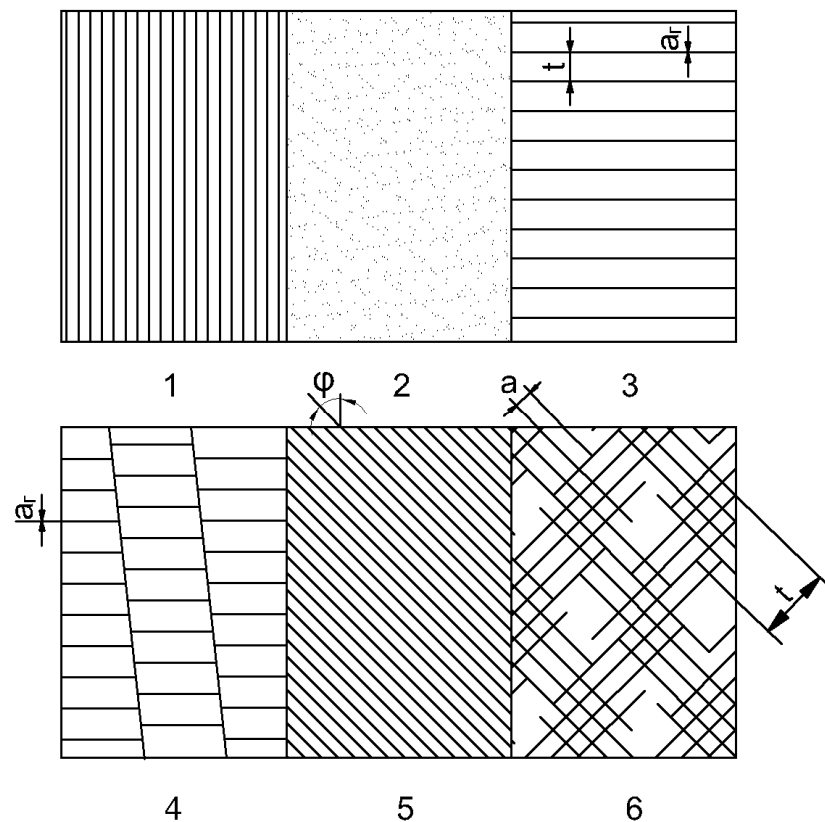
Пропонується реконструювати емульсійну систему стану з метою забезпечення витрати емульсії на стан 800 - 900 м<sup>3</sup>/год. Ця реконструкція дозволить поліпшити якість прокату і підвищити продуктивність стану.

2. Реконструювати існуючі агрегати для промаслення рулонів з установкою пристрою для промаслення сталевого прокату в електричному полі. Це дозволить збільшити швидкість промаслення з 1,6 – 4 м/с до 5 – 6 м/с, з меншою витратою мастила (щільність нанесення мастила – 1,5 г/м<sup>2</sup> на робочій швидкості).

3. Застосувати використання валків з регулярним рельєфом поверхні.

На неперервних станах холодного прокатування в першій і чистовій (4-та клітина на стані 1680), а іноді і в передчистовій клітях використовують робочі валки з насиченою поверхнею  $R_a = 3 - 6$  мкм, а в проміжних клітях (3-я клітина на стані 1680) – валки зі шліфованою поверхнею ( $R_a = 0,8 - 1,6$  мкм). Застосування насичених валків в клітині 1 обумовлено необхідністю покращення умов захоплення штаби і запобігання пробуксовки валків по штабі в процесі прокатування. В чистовій і передчистовій клітях нанесення на поверхню штаби шерохватості запобігає зварюванню витків рулона в процесі рекристалізаційного відпалу в ковпакових печах.

Вплив рельєфу валків різного типу на параметри прокачування вивчався у лабораторних і промислових умовах [9]. Дослідження проводилися на стані з валками діаметром 100 мм і окружною швидкістю  $v \approx 0,3$  м/с. Поверхні типу 1, 5, 6 (рис. 1.8.) створювалися шліфуванням наждачним папером, а поверхня 2 - прокаткою наждачного паперу у валках. Поверхня типу 3 створювалася нанесенням на валок подовжніх рисок з різним кроком (довжина рисок по колу валка  $a_r = 0,2 \dots 0,25$  мм, глибина  $0,06 \dots 0,15$  мм). Поверхня типу 4 створювалася також при віброшліфуванні валків абразивним кругом ( $a_r = 0,7 \dots 1,0$  мм,  $t = 1 \dots 1,5$  мм). Прокатувалися штаби розмірами  $H = 1-1,3$  мм  $B \approx 20$  мм без зміни зазору між валками. Технологічне мастило - емульсол Т. Під час прокатування випередження вимірювалося методом кернових відміток, силу прокатування - месдозами з тензометричним датчиком.



1 — шліфування при  $\phi = 0$ ; 2 — насічка; 3 — хвилястий з подовжніми різками; 4 - хвилястий зі зміщеними подовжніми гранями; 5 - шліфування з  $\phi > 0$ ; 6 - шліфування з  $\phi < 0$  («клітка»).

**Рисунок 1.8** – Рельєф поверхні валків

За дослідними величинами випередження і сили прокатування розраховувалися коефіцієнт тертя і середній нормальний тиск:

$$\gamma_c = \sqrt{Sh / R_c}; \quad (1.1)$$

$$f = 0,5\alpha_c / (1 - 2\gamma_c / \alpha_c); \quad (1.2)$$

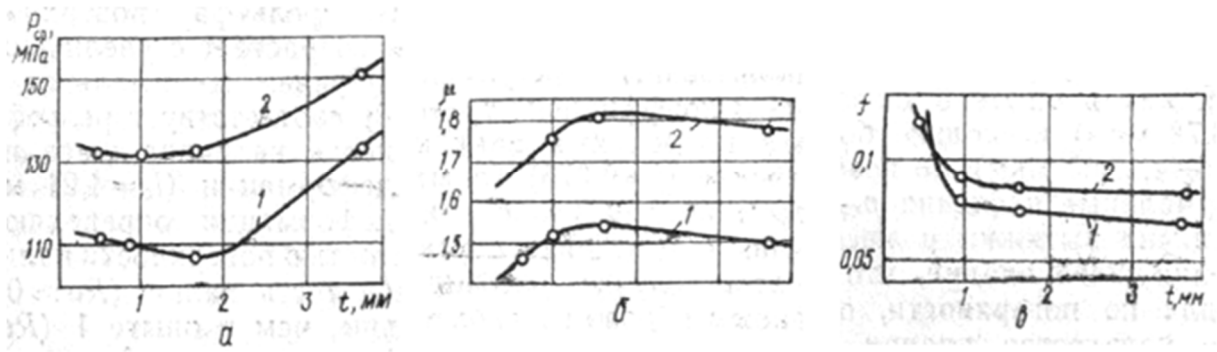
$$p_{cp} = P / Bl_c; \quad (1.3)$$

де  $S$  — випередження;  $h$  — товщина штаби після прокатування;  $P$  — сила прокатування;  $B$  — середня ширина штаби в осередку деформації;  $R_c$ ,  $l_c$ ,  $\alpha_c$ ,  $\gamma_c$  - радіус валків, довжина дуги контакту, кут захвату та нейтрального перетину.

Результати досліджень представлені на рис. 1.9, указують на помітний вплив рельєфа поверхні валка на параметри прокатування. При прокатуванні з обтисненням  $\varepsilon \approx 32\%$  (досліди 1 - 6) у шліфованих валках (рельєф типу 1) коефіцієнт тертя має мінімальне значення 0,074, а при прокатуванні у насічених валках (рельєф типу 2) коефіцієнт тертя максимальний 0,185, що обумовлене збільшенням опору ковзання металу на поверхнях контакту в осередку деформації. При використанні регулярного рельєфу поверхні типу 3 коефіцієнт тертя зростає із збільшенням кроку подовжніх западин. Причому мінімальне його значення 0,075 (опит 6) відповідає рельєфу з кроком западин  $t = 3,6$  мм, коли величина кроку приблизно дорівнює довжині осередку деформації  $l_c = 4,21$  мм. В цьому випадку умови деформації визначаються головним чином шорсткістю поверхні валку. Оскільки в досліді 6 шорсткість валка ( $R_a = 0,7...0,78$  мкм) дещо більше, ніж в досліді 1 ( $R_a = 0,44...0,65$  мкм), то середній нормальний тиск і коефіцієнт тертя дещо більше, а коефіцієнт витяжки декілька менше. При зменшенні кроку западин, що утрудняє ковзання сталі по поверхні, особливо в зоні відставання, де кількість западин завжди більша, відбувається збільшення витяжки в зоні випередження і, разом з цим, збільшення коефіцієнту тертя (досліди 3-5).

Внаслідок неспівпадання в одному вертикальному перетині осередку деформації западин верхнього і нижнього валка, процес прокатування у валках з подібним рельєфом виявляється несиметричним і викликає появу в об'ємі подовжнього розтягуючого напруження, що деформується [9].





**Рисунок 1.9** - Зміна середнього нормального тиску (а), коефіцієнту витяжки (б), коефіцієнту тертя (в) залежно від кроку подовжніх западин на поверхні валка при  $\epsilon$ , %: 1 - 32; 2 - 41 (поверхня типу 3).

Наявністю подовжнього розтягуючого напруження можна пояснити великі значення коефіцієнту витяжки (1,52.-1,54) при прокатці у валках з  $t = 0,9...1,6$  мм в порівнянні з прокаткою в шліфованих валках ( $\mu = 1,48$ ) (рис. 1.9, б, досліди 1, 4, 5). При цих же значеннях  $t$  отримані також і мінімальні величини нормального контактного напруження (106,4 - 110,5 МПа проти 120,4 МПа в досліді 1).

Таким чином, при прокатуванні у валках з подовжніми западинами (рельєф 3) на поверхні існують оптимальні параметри рельєфу, які забезпечують максимальну витяжку штаб при однаковій шорсткості поверхні валків. При прокатуванні у валках з насіченою поверхнею коефіцієнт витяжки мінімальний, а середня нормальна напруга в 1,3 - 1,85 рази вище, ніж в досліді 1, 3 - 6. Аналогічні залежності отримані при деформації металу з обтиском  $\epsilon = 41$  % (рис. 1.9) і при повторних дослідженнях з обтиском  $\epsilon = 25$ %, що підтверджує достовірність отриманих результатів. При прокатуванні в таких валках виступи на штабах виразно видно на профілеграмах, а їх висота складає  $R_t = 6...10$  мкм.

Валки з рельєфом типу 4 мають такі ж переваги, що і валки з рельєфом типу 3 і дозволяють підвищити стійкість штаби проти зсуву на край бочки.

Рельєф валків з косим орієнтуванням ліній западин і гребнів (тип 5, 6) виявляється енергоємнішим при будь-яких значеннях кута  $\varphi > 0$  в порівнянні з рельєфом типу 1. Досліди показують, що прокатування у валках з таким профілем призводить до збільшення коефіцієнту тертя в 1,2 - 1,25 рази, а середнього нормального напруження в 1,1 - 1,13 рази у порівнянні з прокаткою у валках з  $\varphi = 0$ .

## 1.5 Стани нескінченного прокатування

### *Особливості використання технології нескінченного прокатування*

Технологія *нескінченного прокатування* застосовується як на станах гарячої, так і на станах холодного прокатування. Останнім часом її стали застосовувати і на ливарно-прокатних агрегатах, що ще більше підвищило їх ефективність.

Суть технології нескінченного прокатування полягає у тому, що заготовки перед завданням в першу клітину прокатного стану зварюються між собою. В цьому випадку в стані прокочується фактично нескінченна штаба.

Дана технологія передбачає наявність коштовного устаткування на стані, такого як зварювальна машина. Також у разі холодного прокатування встановлюється накопичувач для штаби між зварювальною машиною і першою кліткою, який необхідний для того, щоб не зупиняти процес прокатування під час зварювання двох рулонів між собою.

Переваги технології нескінченного прокатування наступні:

- відсутність втрат часу між проходами двох рулонів, що підвищує продуктивність стану;
- відсутність необхідності відрізання хвостової і головної частин рулона, що дозволяє зменшити відходи металу в обрізь;
- незмінно високі швидкості прокатування завдяки неперервності процесу, стабільність роботи устаткування і скорочення числа поломок;
- стабільні технологічні умови, що підвищує якість прокату;
- збільшення терміну служби прокатного устаткування;
- зниження потреби в технічному обслуговуванні, запчастинах і витратних матеріалах;
- можливість намотування рулонів більшої ваги;
- виробництво рулонів більшого розміру без необхідності внесення коштовних модифікацій в інше устаткування [10].

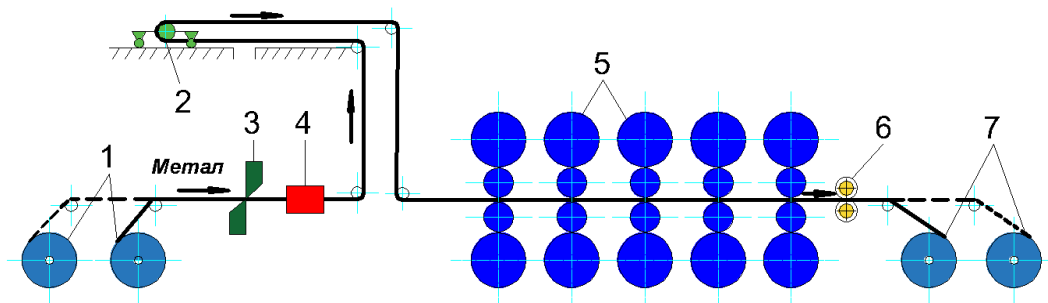
Розглянемо можливості застосування нескінченної прокатування на станах різного типу.

### ***Нескінченне прокатування на станах холодного прокатування***

На станах холодного прокатування прокатують штаби в рулонах, які поступають з широкоштабового стану гарячої прокатування (ШСГП). Перед прокатуванням штаби піддають травленню, щоб видалити з неї окалину, після чого проводиться прокатування в реверсивному одноклітьовому або неперервному стані, у складі якого є 3.-6 клітей. Застосування технології нескінченного прокатування можливе тільки на неперервних станах .

Продуктивність такого стану нескінченного прокатування вища, ніж на звичайному (порулонного прокатування ), завдяки відсутності проблем, пов'язаних з прокаткою кінців штаб і втрат часу на їх заправку. Крім того, значно знижується вірогідність пошкодження валків, за рахунок виключення удару об валки переднього кінця штаби.

Наводимо схему стану 1420 нескінченного прокатування на одному із японських заводів (рис. 1.10).



1 – розмотувач; 2 – петлевий пристрій; 3 – ножиці; 4 – машина зварювальна; 5 – робочі клітини; 6 – ножиці летючі; 7 – моталки.

**Рисунок 1.10** – Схема стану нескінченного прокатування 1420:

Головна частина цього стану - традиційний набір механізмів і машин, що входить до складу неперервного агрегата: правильна машина, розмотувач, ножиці для вирівнювання кінців, зварювальний агрегат з гратознімачем і петлевий пристрій.

Технологічний процес проводиться по наступній схемі. Гарячекатані травлені рулони краном від вихідної частини неперервного травильного

агрегату перевозяться до розмотувачів прокатного стану.

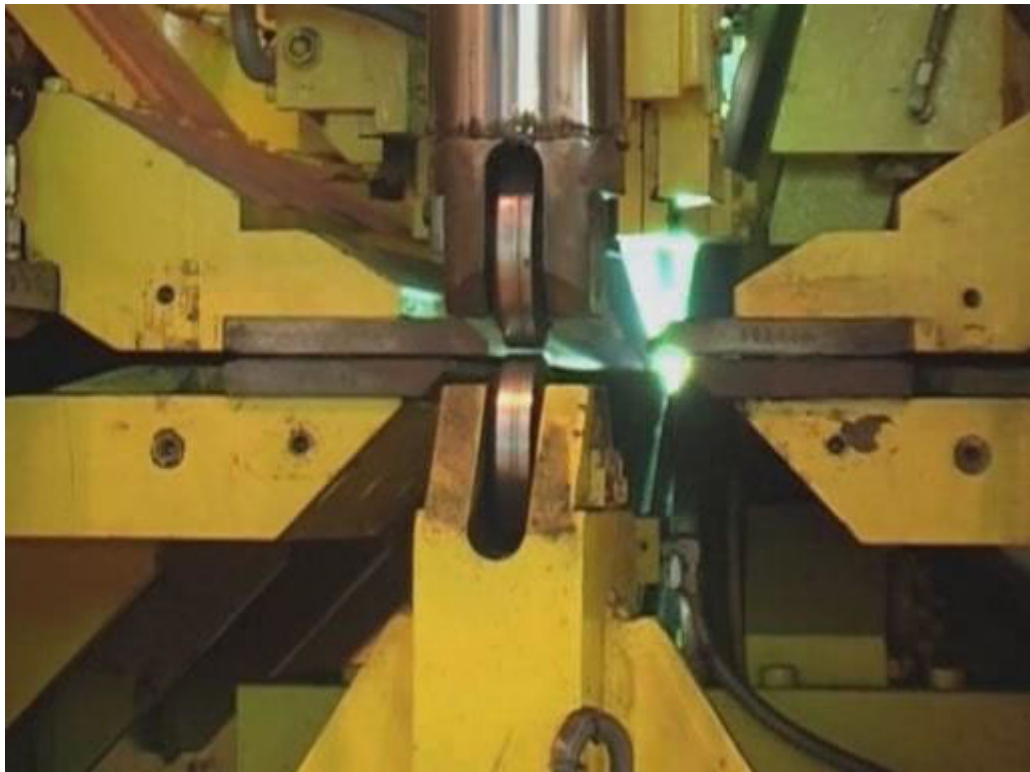
Після установки рулона на барабан розмотувача проводиться центрування, відгортання, і заправка переднього кінця штаби в правильну машину. Завдання рулона в один з розмотувачів і підготовка переднього кінця штаби проводяться під час розмотування штаби з іншого розмотувача.

Після обрізання кінця попереднього рулона і початку наступного рулона проводиться їх зварка на стикозварювальній машині. Обов'язковою умовою є рівна товщина кінців рулону, яка контролюється спеціальним пристроєм.

Стикозварювальна машина (рис. 1.11) призначена для зварювання встик оплавленням кінців суміжних штаб без попереднього підігріву і забезпечення процесу безперервної прокатування .

Режим зварювання (налаштування машини) визначаються електронно-обчислювальною машиною. Для ідентифікації швів пробиваються отвори діаметром 30 мм за центром штаби. Після зварки штаба розганяється до швидкості 850 м/хв і подається в *петлевий накопичувач*, необхідний для забезпечення безперервності процесу прокатування під час зварки кінців штаб. Петлевий накопичувач містить тягучі станції, і систему натяжних механізмів, центруючих і підтримуючих роликів для накопичення близько 800 метрів штаби (рис. 1.12).

Поки йде зварювання кінців рулонів, витрачається штаба з накопичувача, після зварки запаси штаби в накопичувачі заповнюються за рахунок вищої швидкості розмотування рулона.



**Рисунок 1.11** – Стыковзварювальна машина стану холодного прокатування



**Рисунок 1.12** – Петлевий накопичувач

За накопичувачем є натяжні ролики, які створюють задній натяг. Перед першою клітиною також встановлено устаткування, необхідне при переводі стану в режим порулонної прокатування металу.

Таким чином, прокатування штаб в робочих клітках здійснюється неперервно. На стані нескінченного прокатування заправна швидкість необхідна тільки один раз, в решту часу прокатування ведеться з постійною швидкістю. Проте при прокатуванні швів доводиться зменшувати швидкість, щоб уникнути обривання штаби. Таким чином, тільки шви вносять деяку нестабільність в процес прокатування штаб [10].

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

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

Гаряче і холодне прокатування широких штаб є завершальними операціями в процесі виробництва прокату. Саме на цій стадії виникають проблеми з якістю, від якої залежить ціна і обсяг реалізації готової продукції.

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

У літературі [11] звертається увага на такі технології, як прокатування надтонкої гарячекатаної штаби, литво тонких слябів, безперервне литво і прокатування товстого листа, прокатні клітини з розширеним діапазоном настройки, нові системи автоматизації. Важливим технічним досягненням є створення нового неперервного агрегату литва і прокатування Luna на заводі фірми ABS (Acciaierie Bertoli Safau, Удіне/Італія).

Нова технологія включає неперервний процес литва, прокатування, відпалу, правки, випробування, дробеструйної обробки, обробки і упаковки

прокату. Міні-завод розрахований на випуск квадратних і круглих заготовок з вуглецевих, низьколегованих, корозійно стійких, підшипникових і пружинних сталей для машинобудування і автомобільної промисловості.

Розроблена фірмою SMS-DEMAG (Німеччина) технологія високоякісного прокатування (High-Tech-Rolling) представляє набір оптимально узгоджених між собою модулів в замкнутій системі [11]. Технологія SVC (неперервна зміна профілю штаби) займає в ній ключову позицію. High-Tech-Rolling є сукупністю систем регулювання і виконавчих механізмів. Для регулювання товщини штаби передбачені гідравлічні натискні пристрої, а для отримання бажаного профіля використовується технологія бочкоподібності валка, що безступінчасто змінюється. За допомогою SVC на кожній клітині точно встановлюються значення бочкоподібності, закладені в програмі прокатування. У поєднанні з швидкореагуючим пристроєм протизгинання валків виходить виконавська система з високою динамікою регулювання профіля і товщини штаби. На рис. 1.13 показана стратегія виробництва штаб, а на рис. 1.14 – схема регулювання профіля і товщини, планшетності на широкоштабовому стані гарячого прокатування фірми Thyssen Stahl AG в Беккерверті (Німеччина).

На клітках F3 - F5 встановлені системи SVC, а на клітках F3 – F7 системи вигинання робочих валків. Задані управляючою ЕОМ, (рис. 1.13) виробничі дані приймаються ЕОМ регулювання міжвалкового зазору валків і товщини штаби і ЕОМ регулювання планшетності і профіля штаби.

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

Сигнали коректування, що поступають з вимірювального приладу планшетності, приймаються відповідними системами регулювання, після чого спрацьовують системи противигину робочих валків [11].

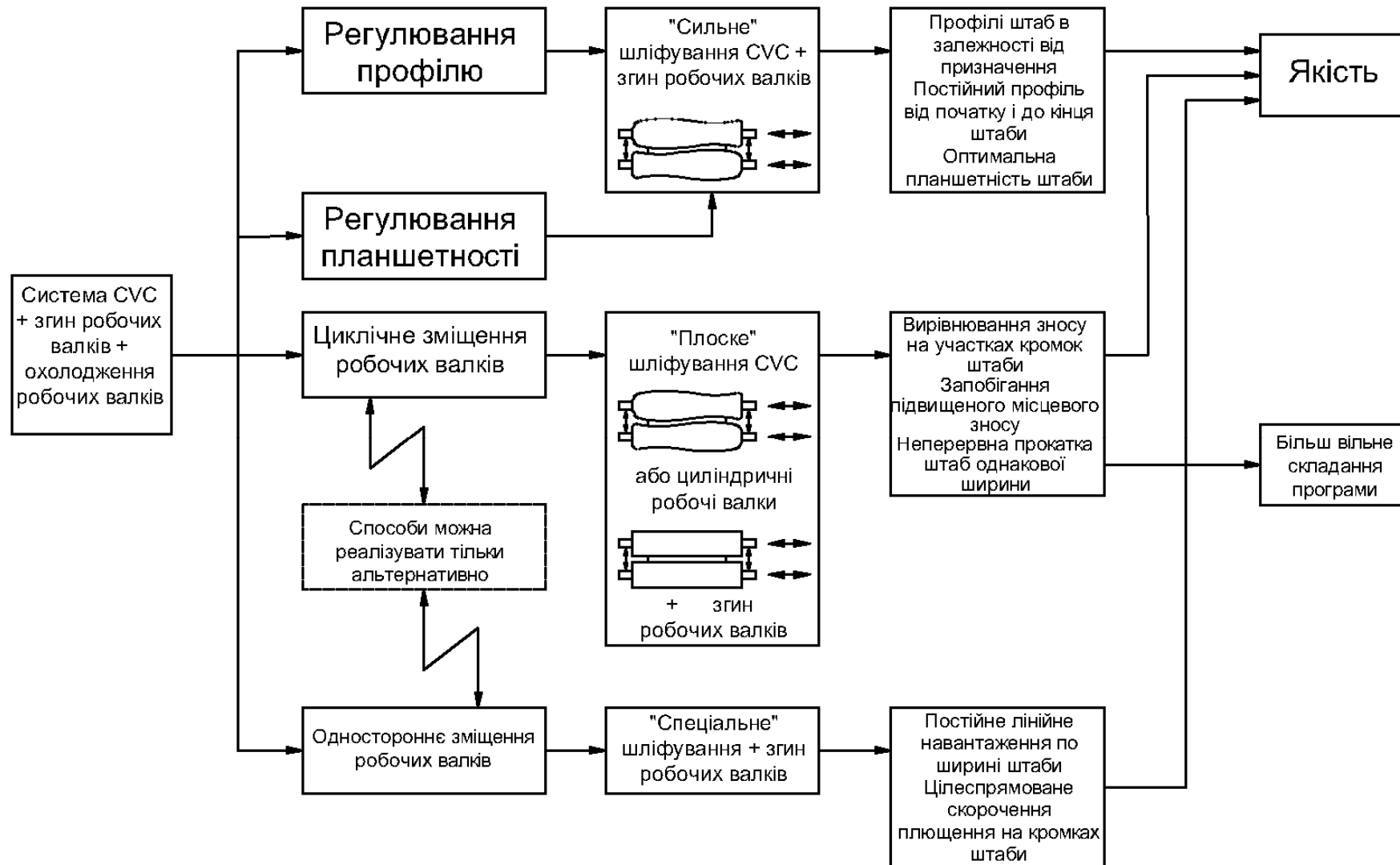
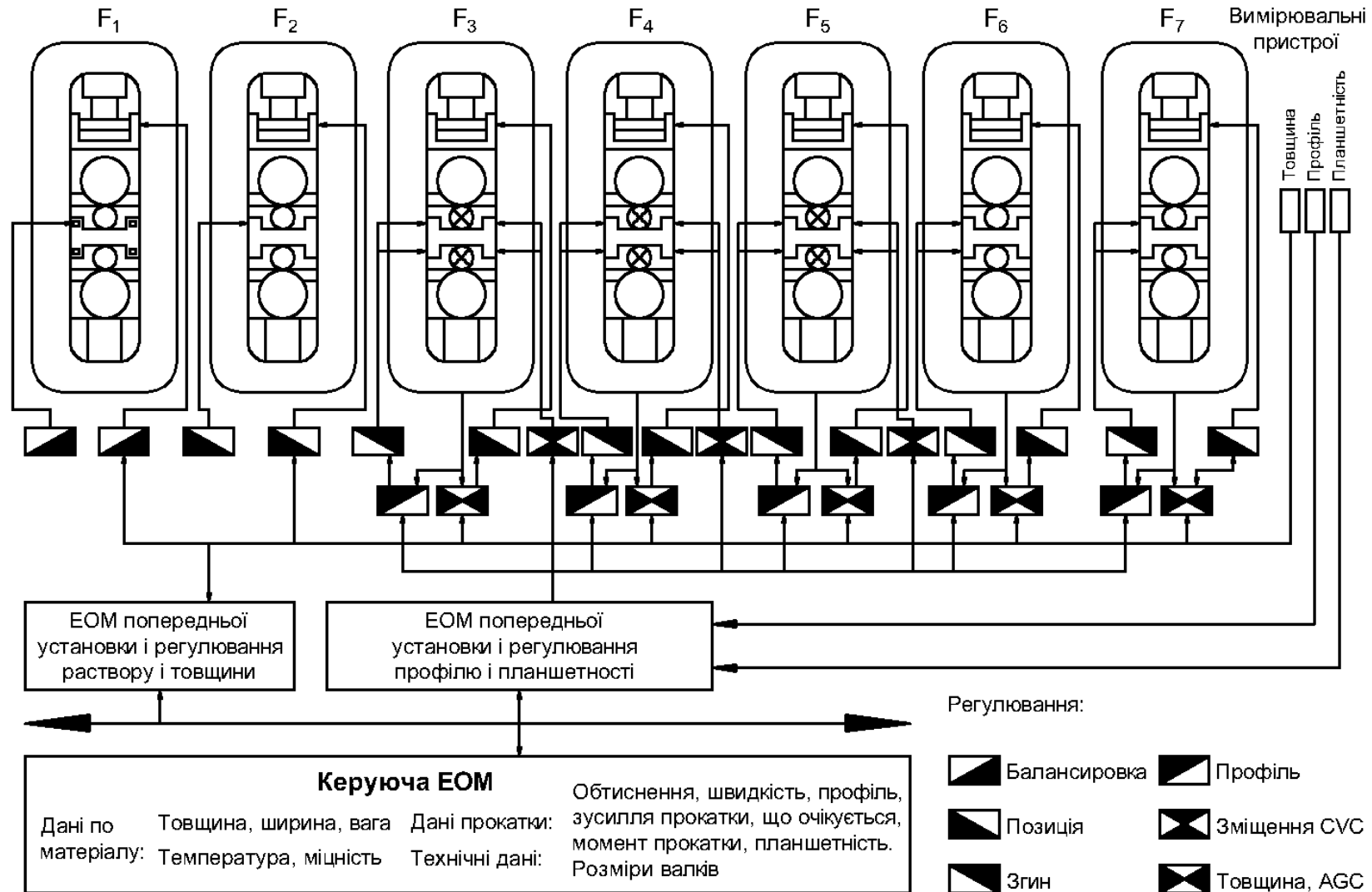


Рисунок 1.13 – Стратегія виробництва штаб найвищої якості





**Рисунок 1.14** – Інтегровані пристрої регулювання профіля, товщини і планшетності на широкоштабовому стані гарячого прокатування фірми Thyssen Stahl AG в Беекерверте

Принцип роботи системи SVC полягає в наступному (рис. 1.15) [11].

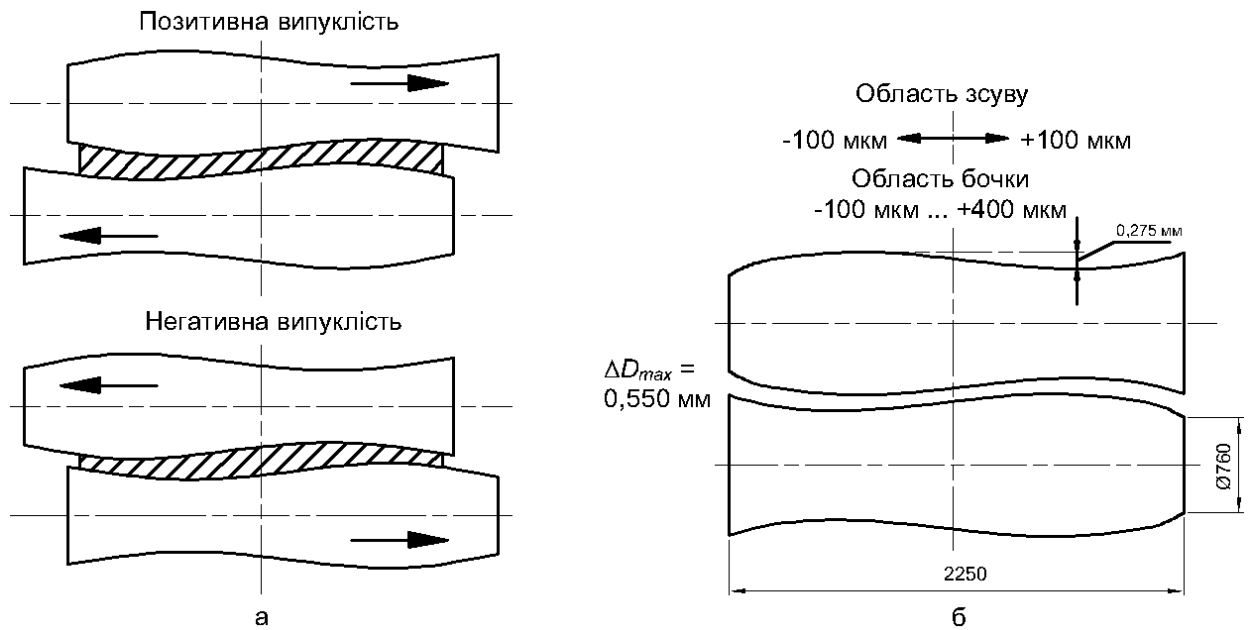
Нижній і верхній робочі валки мають S - образний профіль, ідентичний для обох валків. Валки зміщені один щодо одного на кут  $180^\circ$ , тому вони доповнюють один одного, утворюючи параболічно симетричний контур міжвалкового зазору. При подовжньому взаємному зсуванні відбувається *геометрична* зміна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

Відповідно до технології SVC в перших клітках стану гарячого прокатування форма міжвалкового зазору настраюється на потрібний профіль штаби, який витримується в останніх клітках, що забезпечує її планшетність. Для цього використовують *протизгин* робочих валків. На рис. 1.15 показано співвідношення між необхідною зміною зусилля протизгинання і прокатування залежно від ширини штаб. Таким же чином автоматично витримується постійним профіль штаби і контур міжвалкового зазору при зміні зусилля прокатування по довжині штаби.

При односторонній хвилястості кромки автоматично приводяться в дію натискний механізм останньої клітини, який повертає валки до тих пір, поки штаба не стане рівною.

Завдяки 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 холодного прокатування призводять до непоправних дефектів планшетності, а на стані гарячої прокатування - до поперечної разнотолщинності штаби. Для усунення цього дефекту застосовується циклічне зрушення робочих валків.

Унаслідок пружного сплюснення валків в області кромки штаби часто виникає зменшення профіля. Це явище усувається шліфівкою контура робочого валка на певну довжину. При максимальній ширині штаби валки мають мінімальну опуклістю бочки.



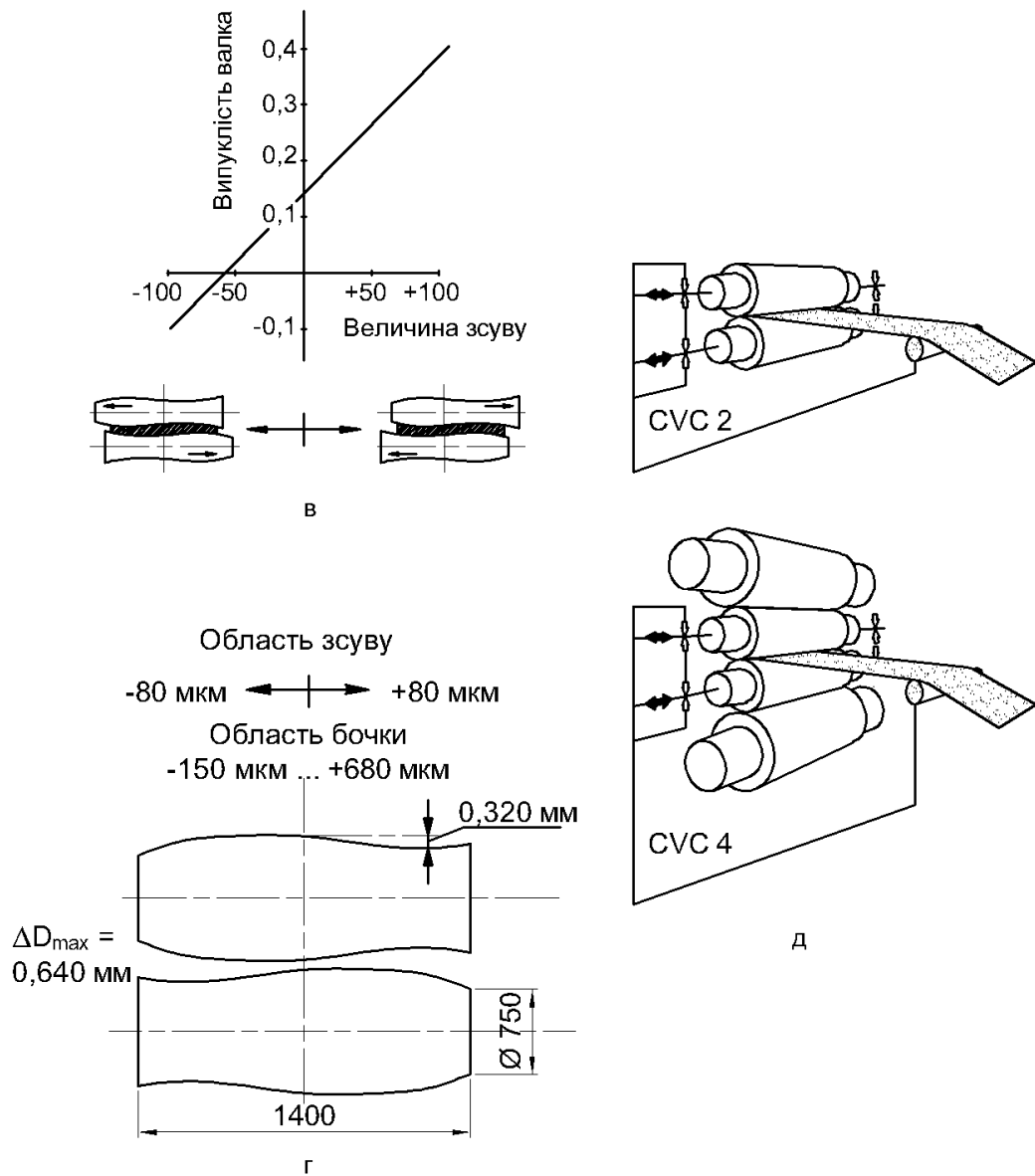
а – принцип неперервної зміни профілю штаби (НЗШ); б – конструкція валків НЗШ для стану гарячого прокатування ; в – залежність між величиною зсуву і регулюємою опуклістю за допомогою системи НЗШ; г – конструкція валків НЗШ для дресирувального стану; д – застосування системи CVC в різних схемах прокатування штаб; е – прокатний стан з CVC; ж – осьове зміщення валків в підшипниках Моргойла на клітині ДУО

**Рисунок 1.15** – Принцип дії системи CVC

У разі прокатування вузьких штаб, при зрушенні валків відбувається зміна опуклості валка у сторону збільшення. Таким чином, компенсується природний вигин опорних і робочих валків і створюється умова для регулювання планшетності на останній клітині [11].

У станах тандем холодного прокатування планшетність штаби при правильному розподілі обтиснення визначається останньою кліттю, тому в неї вбудована система CVC, що працює спільно з системами протизгинання робочих валків і натискних гідравлічних механізмів.

Як приклад реалізації технології High-Tech-Rolling і технології CVC фірмою СМС Шлоеманн Зімаг Акциенгезельшафт можна привести широкоштабовий стан гарячого прокатування 2050 мм (введений в експлуатацію в 1990 р.) і стан холодного прокатування (1988 р.) в КНР.



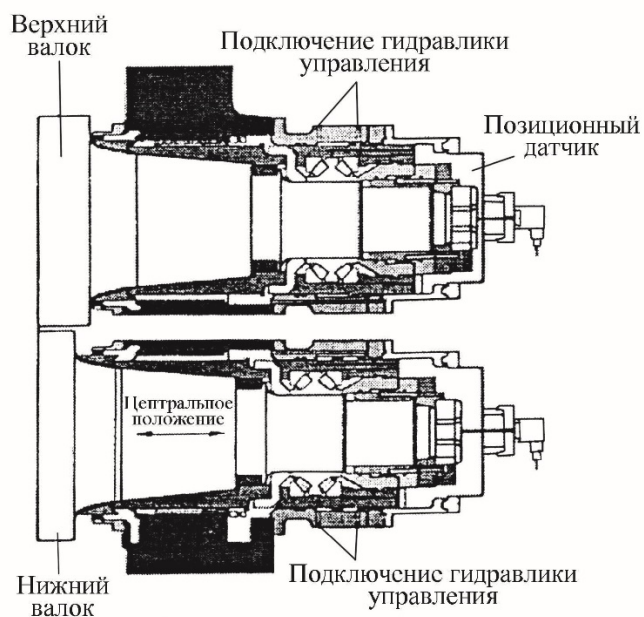
**Рисунок 1.15 - Продовження**

На стані гарячого прокатування, на ділянці чорнової групи клітей, застосовані гідронатискні механізми, що використовуються як установочні органи в автоматичній системі регулювання ширини прокату. High – Tech-Rolling в чистовій групі клітей представлена регулюючими і установочними системами: гідравлічними натискними механізмами, системою CVC і системою протизгинання робочих валків, спільна робота яких забезпечує високу якість кінцевої продукції (прокатування в полі допуску, мінімальна подовжня і поперечна різновтовщинність, висока планшетність). Усі сім чистових клітей оснащені гідравлічними механічними механізмами. Електромеханічні установочні механізми служать тільки для переміщення валків при перевалці і

для компенсації зносу робочих валків. Максимальне зусилля прокатування складає 50 МН на клітках F1 - F3 і 50 МН на F4 - F7. Швидкість електромеханічної установки валків 6 мм/с, гідравлічної - 4 мм/с (рис. 1.15, 1.16). Всі чистові клітини оснащені системами CVC і системами вигинання робочих валків. На рис. 1.15 показана сучасна клітина F3 [11].

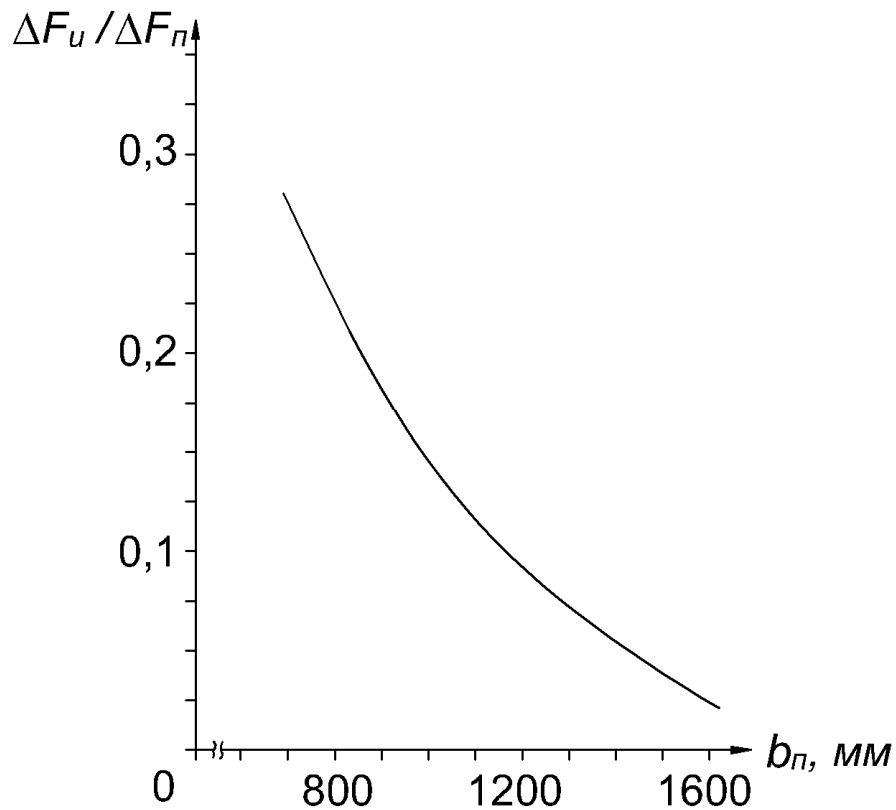


e)



ж)

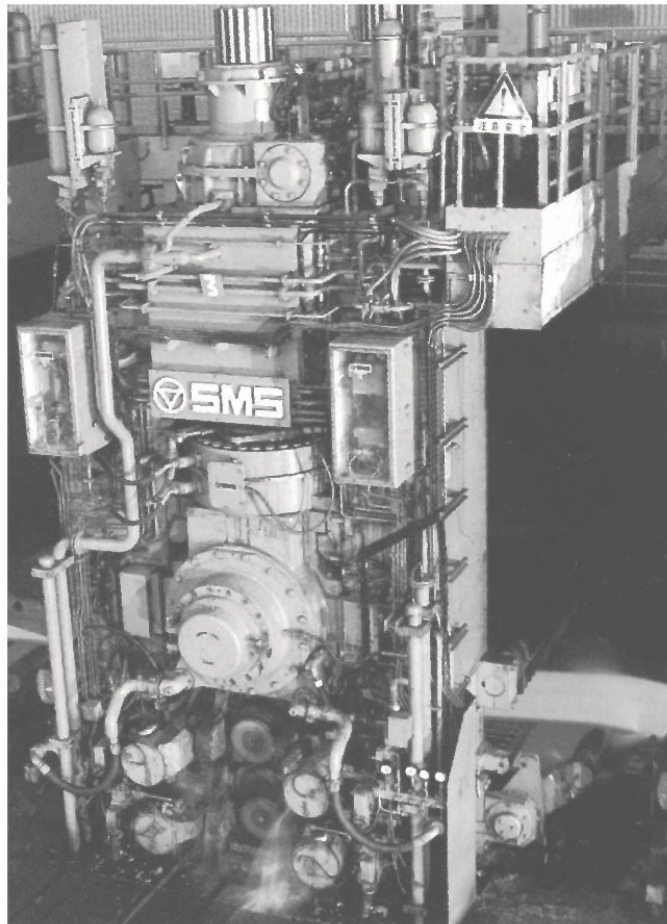
**Рисунок 1.15 - Закінчення**



**Рисунок 1.16**– Залежність коефіцієнту кореляції ( $\Delta F_u / \Delta F_n$ ) від ширини штаби:

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

На п'ятиклітинному стані холодного прокатування фірми Шлоеманн – Зімаг прокатують травлену гарячекатану штабу завтовшки 1,7...6,5 мм з отриманням холоднокатаної штаби товщиною 0,3...3,6 мм, а також високолеговану сталеву штабу з високою межею міцності (рис. 1.17 і 1.18). Ширина штаби складає 800... 1850 мм; максимальна швидкість прокатування 1800 м/хв; ємність накопичувача - 720 м. Для отримання максимальної якості (по допускам і планшетності) стан обладнаний системою SVC на клітині № 5 для безступінчастого регулювання міжвалкового зазору [11].



**Рисунок 1.17** – Сучасна прокатна клітина F3



**Рисунок 1.18** – Неперервний тандем стан з пристроями для перевалки валків

## 2 ДОСЛІДНИЦЬКО - РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 2.1 Дослідження і розрахунок енергосилових параметрів при холодному прокатуванні тонких штаб

#### 2.1.1 Розрахунок контактних напружень при прокатуванні

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

для зони відставання

$$P_0 = \frac{\sigma_T}{\delta} \left[ (\xi_0 \cdot \delta - 1) \cdot \left( \frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right] \quad (2.1)$$

для зони випередження

$$P_1 = \frac{\sigma_T}{\delta} \left[ (\xi_1 \cdot \delta + 1) \cdot \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^\delta - 1 \right] \quad (2.2)$$

де  $\sigma_T$  - середня за осередком деформації напруга плинності, МПа:

$$\delta = \frac{2 \cdot f \cdot l_d}{\Delta h} \quad (2.3)$$

$P_0$  і  $P_1$  - нормальні контактні напруження відповідно у зоні відставання і зоні випередження, МПа;

$h_0$ ,  $h_1$ ,  $\Delta h$  – початкова і кінцева товщина штаби і абсолютне обтиснення, мм;

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

$l_d$  – довжина осередку деформації, мм;

$f$  – коефіцієнт тертя;

$\xi_0$ ,  $\xi_1$  – коефіцієнт заднього і переднього натягу.

Для визначення величини тисків у довільному перетині осередку деформації розроблено блок-схему розрахунку (рис. 2.1). Осередок деформації розбивається на ряд перетинів (від 0 до k). У кожному перетині визначають поточну висоту штаби  $h$ , яка порівнюється з висотою штаби у нейтральному



перетині  $h_\gamma$ . Висота  $h_\gamma$  визначається з умови рівності тисків  $P_0$  і  $P_1$  у цьому перетині з боку зони відставання і випередження:

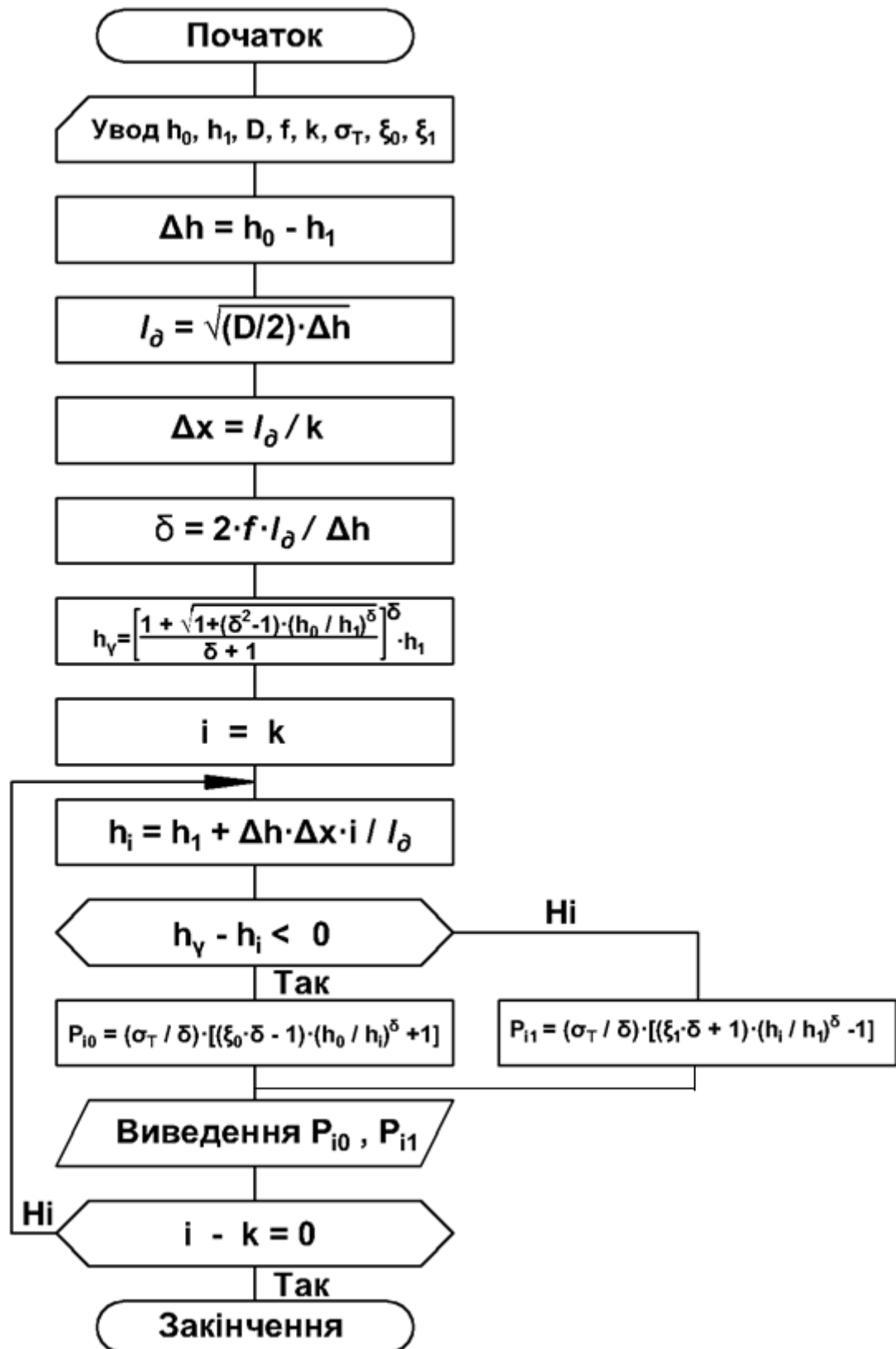


Рисунок 2.1 – Блок – схема розрахунку нормальних контактних напружень при поздовжньому прокатуванні штаб

$$h_{\gamma} = \left[ \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{\delta}}}{\delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}} \cdot h_1 \quad (2.4)$$

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

Розрахунок виконувався у програмному комплексі Mathcad Prime 8 відповідно до блок-схеми, що наведена на рис. 1.1. Осередок деформації розбивався на 20 перетинів (показники  $k$ ,  $i$ ) і у кожному перетині розраховували нормальні контактні напруження  $P$ . Початкова товщина штаби 2 мм, кінцева – 1,5 мм, діаметр валків 500 мм, коефіцієнт тертя 0,05. Далі наведено хід розрахунку у програмі Mathcad Prime 8 і програма розрахунку контактних напружень при поздовжньому прокатуванні тонких штаб.

$h_0 := 2$	$h_1 := 1.5$	$D := 500$	$f := 0.05$	$k := 20$
$\sigma_T := 500$	$\zeta_0 := 1$	$\zeta_1 := 1$	$\Delta h := h_0 - h_1 = 0.5$	
$\varepsilon := \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100 = 25$	$l_{\partial} := \sqrt{\frac{D}{2} \cdot \Delta h} = 11.18$	$\Delta x := \frac{l_{\partial}}{k} = 0.559$		
$\delta := \frac{2 \cdot f \cdot l_{\partial}}{\Delta h} = 2.236$	$h_{\gamma} := \left( \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{\delta}}}{\delta + 1} \right)^{\frac{1}{\delta}} \cdot h_1 = 1.637$			

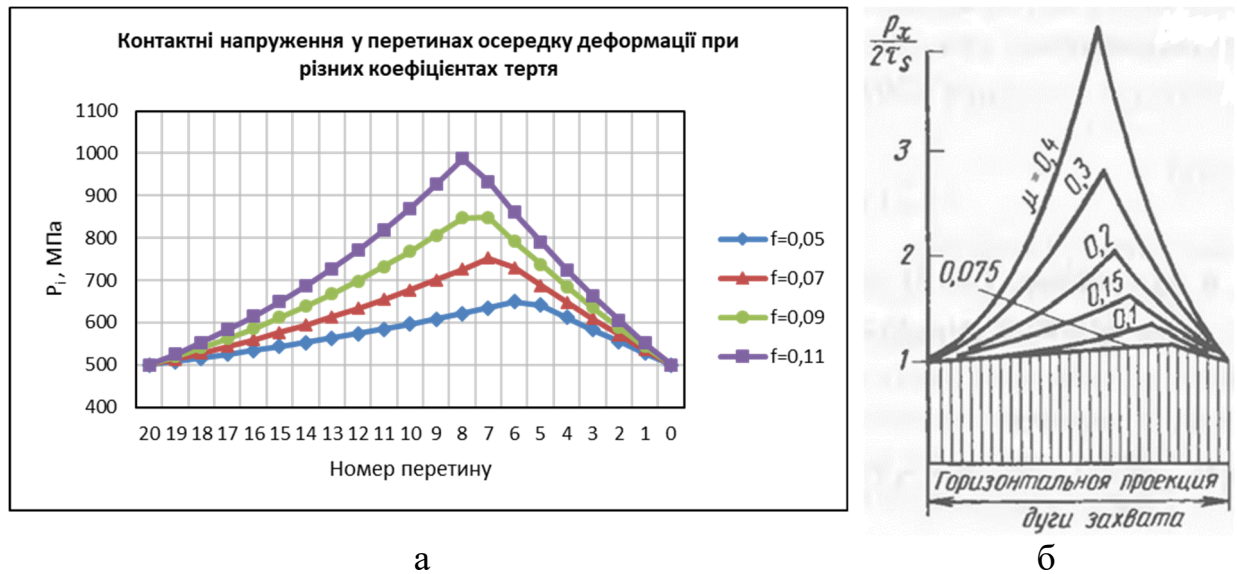
$$\begin{array}{l}
 P := \left\| \begin{array}{l}
 \text{for } i \in 0..20 \\
 \left\| \begin{array}{l}
 h_i \leftarrow h_1 + \frac{\Delta h}{l_\partial} \cdot \Delta x \cdot i \\
 \text{if } h_\gamma - h_i < 0 \\
 \left\| \begin{array}{l}
 P_{0_i} \leftarrow \frac{\sigma_T}{\delta} \cdot \left( (\zeta_0 \cdot \delta - 1) \cdot \left( \frac{h_0}{h_i} \right)^\delta + 1 \right) \\
 \text{else} \\
 \left\| \begin{array}{l}
 P_{1_i} \leftarrow \frac{\sigma_T}{\delta} \cdot \left( (\zeta_0 \cdot \delta + 1) \cdot \left( \frac{h_i}{h_1} \right)^\delta - 1 \right) \\
 \text{stack}(P_1, \text{submatrix}(P_0, 6, 20, 0, 0)) \\
 \max(P) = 648.561
 \end{array} \right. \\
 \end{array} \right. \\
 \end{array} \right. \\
 = \begin{array}{l}
 500 \\
 527.245 \\
 555.048 \\
 583.411 \\
 612.336 \\
 641.825 \\
 648.561 \\
 634.509 \\
 621.12 \\
 608.353 \\
 596.171 \\
 584.54 \\
 573.426 \\
 562.802 \\
 552.638 \\
 542.909 \\
 533.591 \\
 524.661 \\
 516.099 \\
 507.884 \\
 500
 \end{array} \\
 i := 0..20 = \begin{array}{l}
 0 \\
 1 \\
 2 \\
 3 \\
 4 \\
 5 \\
 6 \\
 7 \\
 8 \\
 9 \\
 10 \\
 11 \\
 12 \\
 13 \\
 14 \\
 15 \\
 16 \\
 17 \\
 18 \\
 19 \\
 20
 \end{array}
 \end{array}$$

З метою виявлення впливу коефіцієнту тертя на характер і величину розподілу тисків по довжині осередку деформації, аналогічні розрахунки були виконані і для коефіцієнтів тертя 0,07, 0,09 і 0,11.

Результати розрахунків наведено у табл. 2.1 і на рис. 2.2. Як видно, отримані дані збігаються з літературними даними: чим більше коефіцієнт тертя, тим стає більш значним зростання контактного напруження у напрямку нейтрального перетину, а в наслідок цього зростає і сила прокатування. Діаметр валків має аналогічний вплив: зі збільшенням діаметру валків і довжини дуги захвату, сила прокатування збільшується, а нейтральний перетин зміщується вліво на рис. 2.2. При натягненні штаби нормальний контактний тиск значно зменшується: чим більше сила натягу, тим менше сила прокатування. Натягнення зі сторони входу металу в валки, так само, як і натягнення зі сторони виходу металу з валків викликає зменшення нормального контактного тиску.

Напряг прокатування

→



а – розрахункові дані; б – літературні дані [11]

**Рисунок 2.2** - Епюри розподілу тисків по довжині осередку деформації при різних значеннях коефіцієнту тертя

**Таблиця 2.1** - Результати розрахунку нормальних контактних напружень у програмі Mathcad Prime 8 при різних коефіцієнтах тертя

№ перетину	Контактне напруження (МПа) при коефіцієнті тертя:			
	f=0,05	f=0,07	f=0,09	f=0,11
20	500,00	500,00	500,00	500,00
19	507,88	513,67	519,51	525,43
18	516,10	528,07	540,31	552,84
17	524,66	543,25	562,49	582,41
16	533,59	559,27	586,17	614,34
15	542,91	576,19	611,46	648,86
14	552,64	594,06	638,51	686,21
13	562,80	612,96	667,46	726,68
12	573,43	632,96	698,47	770,56
11	584,54	654,14	731,72	818,20
10	596,17	676,59	767,42	869,99
9	608,35	700,40	805,77	926,35
8	621,12	725,69	847,01	987,75
7	634,51	752,55	849,04	933,71
6	648,56	729,36	791,88	859,89
5	641,83	687,86	737,28	790,32
4	612,34	647,71	685,16	724,82
3	583,41	608,87	635,45	663,21
2	555,05	571,32	588,07	605,31
1	527,25	535,04	542,94	550,97
0	500,00	500,00	500,00	500,00

### 2.1.2 Осередок деформації

#### Алгоритм розрахунків характеристик осередку деформації

Алгоритм розрахунків розмірів осередку деформації є послідовністю розрахунку вказаних нижче параметрів [6].

1. Абсолютне обтиснення штаби

$$\Delta h = h_0 - h_1. \quad (2.1)$$

2. Відносне обтиснення

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0}. \quad (2.2)$$

3. Кут захвату

$$\alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h}{D}}. \quad (2.3)$$

4. Довжина дуги захвату

$$l_d = \sqrt{\frac{\Delta h \cdot D}{2}} = \sqrt{\Delta h \cdot R}. \quad (2.4)$$

5. Ширина штаби після проходу  $b_1$  і величина розширення штаби  $\Delta b$ :

$$b_1 = b_0 + \Delta b; \quad \Delta b = \frac{0,4 \cdot \Delta h \cdot l_d}{h_0} = 0,4 \cdot \varepsilon \cdot l_d. \quad (2.5)$$

6. Площа контактної поверхні штаби з валками

$$A_k = 0,5 \cdot l_d \cdot (b_0 + b_1). \quad (2.6)$$

7. Коефіцієнт витяжки (визначається з умови постійності об'єму)

$$\lambda = \frac{h_0 \cdot b_0}{h_1 \cdot b_1}. \quad (2.7)$$

8. Довжина штаби після проходу прокатки

$$L_1 = \lambda \cdot L_0. \quad (2.8)$$

9. Коефіцієнт розширення і обтиснення штаби

$$\xi = \frac{b_0}{b_1}; \quad \frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}. \quad (2.9)$$

**Дослідження впливу обтиснення і діаметру валків на характеристики осередку деформації при прокатуванні штаб**

Необхідно визначити кут захвату і вплив обтиснення на довжину осередку деформації при прокатці штаби в валках діаметром 400, 500, 600 і 700 мм, якщо обтиснення мають наступні значення: 0,05; 0,1; 0,2; 0,4 і 0,8 мм. Побудувати графіки залежності кута захвату і довжини осередку деформації від діаметра валків і обтиснення.

**Рішення**

1. Розраховуємо довжину дуги захвату штаби валками за формулою (табл. 2.2)

$$l_d = \sqrt{\Delta h \cdot R}.$$

**Таблиця 2.2** – Зміна довжини дуги захвату від діаметра валків і обтиснення

Обтиснення $\Delta h$ , мм	Довжина дуги захвату $l_d$ , мм при діаметрі валків $D_B$			
	$D_B=400$ мм	$D_B=500$ мм	$D_B=600$ мм	$D_B=700$ мм
0,05	3,16	3,54	3,87	4,18
0,1	4,47	5,00	5,48	5,92
0,2	6,33	7,07	7,75	8,37
0,4	8,94	10,00	10,95	11,83
0,8	12,65	14,14	15,49	16,73

2. Розраховуємо кут захвату металу валками за формулою (табл. 2.2)

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}.$$

3. Використовуючи дані табл. 2.2 і 2.3, будуємо графіки вказаних залежностей (рис. 2.3 - 2.4).

Таблиця 2.3 – Зміна кута захвату від діаметра валків і обтиснення

Обтиснення $\Delta h$ , мм	Кут захвату $\alpha$ , градуси при діаметрі валків $D_B$			
	$D_B=400$ мм	$D_B=500$ мм	$D_B=600$ мм	$D_B=700$ мм
0,05	0,91	0,81	0,74	0,69
0,1	1,28	1,15	1,05	0,97
0,2	1,81	1,62	1,48	1,37
0,4	2,56	2,29	2,09	1,94
0,8	3,62	3,24	2,96	2,74

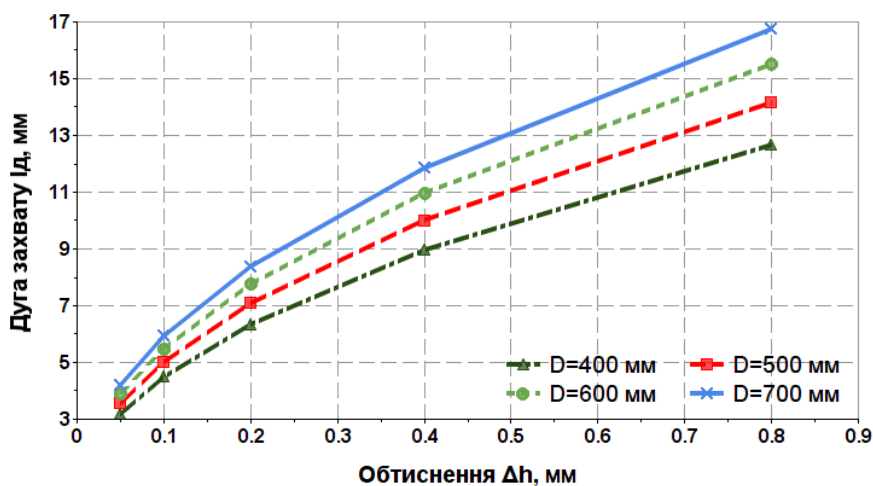


Рисунок 2.3 - Залежність довжини дуги захвату від діаметра валків і обтиснення

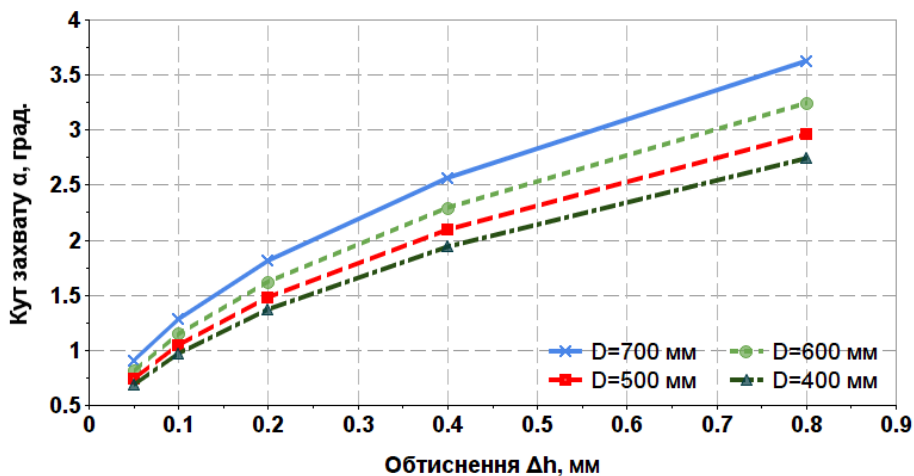


Рисунок 2.4 - Залежність кута захвату від діаметра валків і обтиснення

Таким чином встановлено, що зі збільшенням абсолютного обтиснення і діаметра валків, кут захвату і довжина дуги захвату збільшуються.

На основі даних табл. 2.2 і 2.3 у програмному комплексі Mathcad Prime 8 побудовані контурні графіки, що зображені на рис. 2.5.

***Дослідження впливу заднього і переднього натягнення на випередження і швидкість виходу переднього кінця штаби зі стану***

***Алгоритм розрахунку***

1. Визначаємо, або задаємо, умови контактного тертя і межі текучості металу по клітям стану, тобто значення  $f$ ,  $2K$  заздалегідь відомі [6].
2. Вибираємо режим натягання по клітям стану: заднє  $\sigma_{01}$ , переднє  $\sigma_{11}$  – натягнення в першій і  $\sigma_{02}$ ,  $\sigma_{12}$  – в другій (останній) клітях, значення яких не повинно перевищувати допустимого відсотку межі текучості штаби.
3. Приймаємо існуючий режим обтиснення: товщину на вході  $h_{01}$  і виході  $h_{11}$  в першій і на виході  $h_{12}$  другої клітини, а також швидкість обертання валків  $v_2$  другої (останньої) клітини стану.
4. Визначаємо випередження штаби у валках другої (останньої) клітини стану:

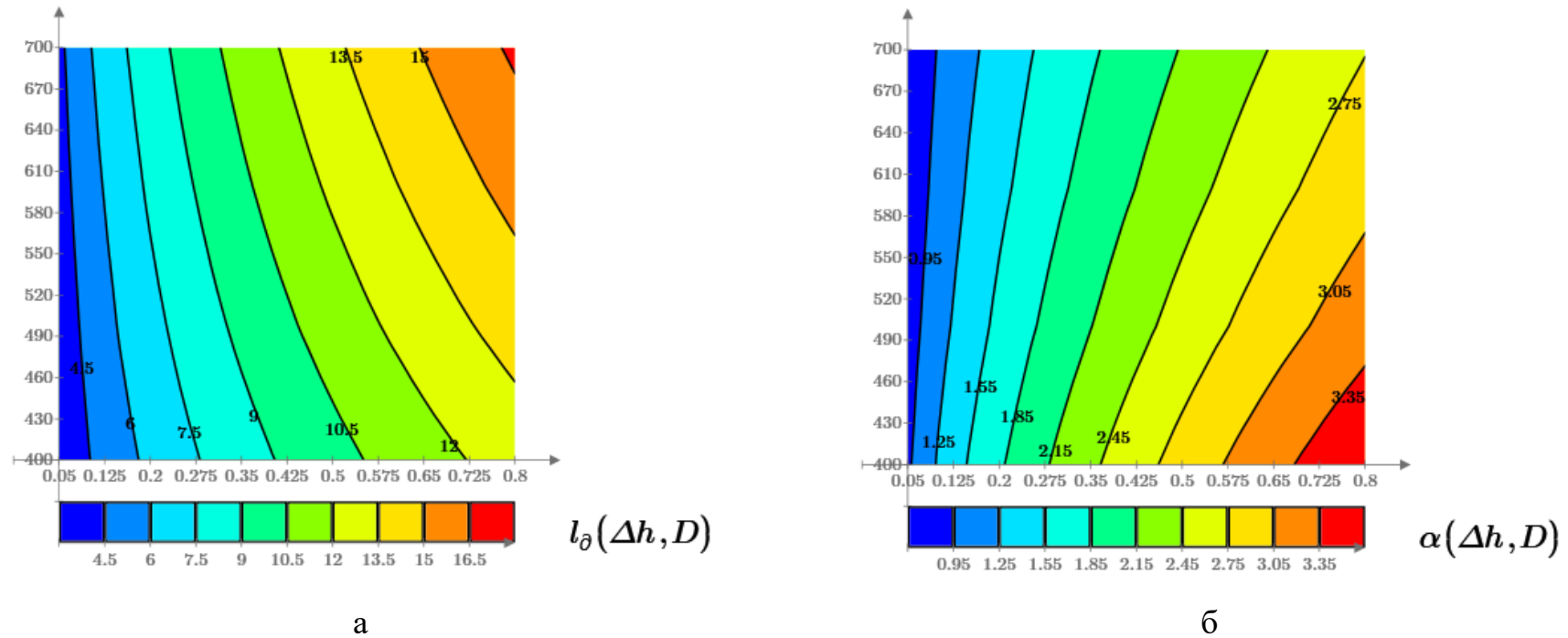
$$S_2 = S_{\text{штаби}}$$

5. Визначаємо швидкість штаби  $v_{\text{штаби}2}$  на виході з другої (останньої) клітини стану, використовуючи величину випередження штаби  $S_2$ .
6. Розраховуємо постійну (константу) неперервного стану, тобто величину  $C$ .
7. Визначаємо випередження штаби  $S_2$  в валках першої клітини.
8. Використовуючи рівняння постійності секундних об'ємів, визначаємо окружну швидкість обертання валків першої клітини  $v_{\text{валків}1}$ .
9. Розраховуємо швидкість штаби на виході з першої клітини  $v_{\text{штаби}1}$ .

В результаті виконання розрахунків визначається:

- швидкість прокатування штаби по клітям неперервного стану;
- вплив переднього натягнення штаби на випередження і швидкість виходу металу з валків.





**Рисунок 2.5** – Контурні графіки (графіки ліній рівня) залежності довжини дуги захвату  $l_{\partial}$ , мм (а), і кута захвату  $\alpha$ , градуси (б) від діаметра валків  $D$ , мм і обтиснення  $\Delta h$ , мм, (горизонтальна вісь –  $\Delta h$ , вертикальна вісь –  $D$ )

**Розрахунок швидкість виходу переднього кінця штаби і випередження**

Необхідно визначити і побудувати графіки впливу заднього і переднього натягнення на випередження і швидкість виходу переднього кінця штаби з листопрокатного стану, який має діаметр робочих валків 520 мм. Товщина штаби до прокатування 2,07 мм, після прокатування 1,8 мм, коефіцієнт контактної тертя  $f=0,05$ , межа текучості штаби після прокатування  $\sigma_{s1} = 375$  МПа, валки обертаються зі швидкістю  $v_B=24$  м/сек. Переднє натягнення змінюється і приймає наступні значення:  $\sigma_1 = 0,05; 0,1; 0,15; 0,20 \cdot \sigma_{s1}$ .

**Рішення**

1. Розраховуємо абсолютне обтиснення штаби при прокатуванні:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 2,07 - 1,8 = 0,27 \text{ мм.}$$

2. Знаходимо довжину дуги захвату штаби валками:

$$l_d = \sqrt{\Delta h \cdot R} = \sqrt{0,27 \cdot 260} = 8,38 \text{ мм.}$$

3. Визначаємо переднє питоме натягнення штаби [6]:

$$\sigma_1 = 0,05 \cdot \sigma_{s1} = 0,05 \cdot 375 = 18,75 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_2 = 0,1 \cdot \sigma_{s1} = 0,1 \cdot 375 = 37,5 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_3 = 0,15 \cdot \sigma_{s1} = 0,15 \cdot 375 = 56,25 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_4 = 0,2 \cdot \sigma_{s1} = 0,2 \cdot 375 = 75,0 \text{ МПа.}$$

4. Знаходимо коефіцієнти натягнення переднього та заднього кінців штаби:

$$2 \cdot K_1 = 1,155 \cdot \sigma_{s1} = 1,155 \cdot 375 = 418,125 \text{ МПа;}$$

$$\delta = \frac{2 \cdot f \cdot l_d}{\Delta h} = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 8,38}{0,27} = 3,103;$$

$$\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{2K_0} = 1, \text{ оскільки } \sigma_0 = 0;$$

$$\xi_{11} = 1 - \frac{\sigma_1}{2K_1} = 1 - \frac{18,75}{418,125} = 0,955;$$

$$\xi_{12} = 1 - \frac{\sigma_2}{2K_1} = 1 - \frac{37,5}{418,125} = 0,913;$$

$$\xi_{13} = 1 - \frac{\sigma_3}{2K_1} = 1 - \frac{56,25}{418,125} = 0,865;$$

$$\xi_{14} = 1 - \frac{\sigma_4}{2K_1} = 1 - \frac{75,0}{418,125} = 0,821.$$

5. Розраховуємо випередження з урахуванням величини натягнення:

$$S_{11} = \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_{11}} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{3,103-1}} - 1 = \sqrt[2 \cdot 3,103]{\frac{1}{0,955} \left(\frac{2,07}{1,8}\right)^{3,103-1}} - 1 = 0,056;$$

$$S_{12} = \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_{12}} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{3,103-1}} - 1 = \sqrt[2 \cdot 3,103]{\frac{1}{0,913} \left(\frac{2,07}{1,8}\right)^{3,103-1}} - 1 = 0,064;$$

$$S_{13} = \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_{13}} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{3,103-1}} - 1 = \sqrt[2 \cdot 3,103]{\frac{1}{0,865} \left(\frac{2,07}{1,8}\right)^{3,103-1}} - 1 = 0,073;$$

$$S_{14} = \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_{14}} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{3,103-1}} - 1 = \sqrt[2 \cdot 3,103]{\frac{1}{0,821} \left(\frac{2,07}{1,8}\right)^{3,103-1}} - 1 = 0,082.$$

6. Визначаємо швидкість виходу штаби  $v_{ш}$  з валків для кожного проходу:

$$v_{ш1} = v_B \cdot (1 + S_{11}) = 24 \cdot (1 + 0,056) = 25,35 \text{ м/с};$$

$$v_{ш2} = v_B \cdot (1 + S_{12}) = 24 \cdot (1 + 0,064) = 25,55 \text{ м/с};$$

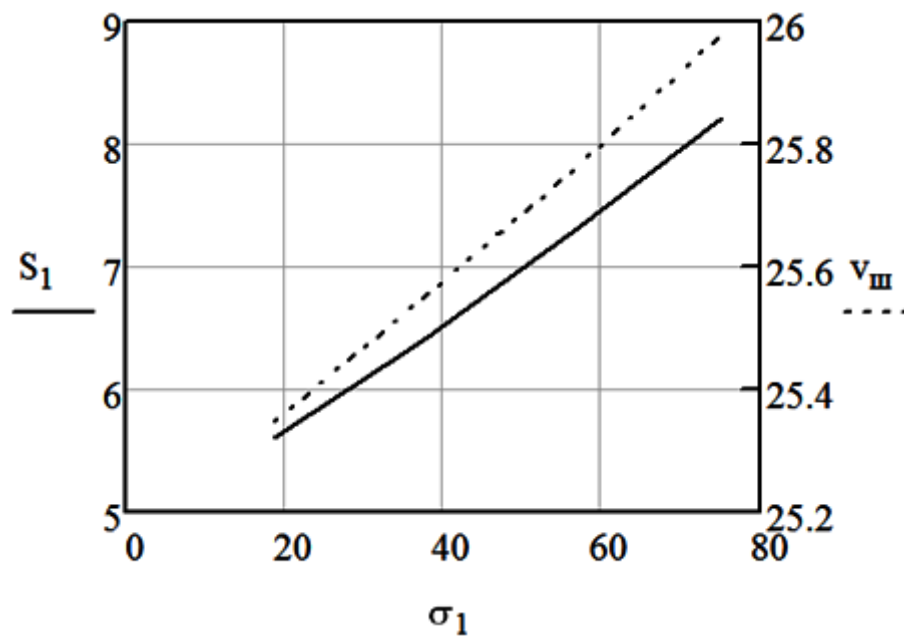
$$v_{ш3} = v_B \cdot (1 + S_{13}) = 24 \cdot (1 + 0,073) = 25,76 \text{ м/с};$$

$$v_{ш4} = v_B \cdot (1 + S_{14}) = 24 \cdot (1 + 0,082) = 25,98 \text{ м/с}.$$

7. Будуємо графіки впливу переднього натягнення на випередження і швидкість виходу переднього кінця штаби з валків клітини (рис. 2.6) попередньо занісши необхідні дані в табл. 2.4.

**Таблиця 2.4** – Вплив переднього натягнення на швидкість виходу штаби з валків і випередження

Відношення натягнення до межі текучості	Параметри процесу прокатування		
	натягнення штаби $\sigma_1$ , МПа	випередження $S_1$ , %	швидкість прокатування , $v_{ш}$ , м/с
0,05	18,75	5,6	25,35
0,10	37,5	6,4	25,55
0,15	56,25	7,3	25,76
0,20	75,0	8,2	25,98



**Рисунок 2.6** – Залежність швидкості виходу штаби з валків ( $v_{ш}$ ) і випередження ( $S_1$ ) від переднього натягнення  $\sigma_1$ .

### 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОЩИННОСТІ І МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХОЛОДНОКАТАНОГО ТОНКОШТАБОВОГО ПРОКАТУ

#### 3.1 Математичне моделювання площинності прокату

Під час математичного опису процесу холодної прокатування важливу (а можливо, і головну) роль відіграє правильне уявлення взаємозв'язку характеристик поперечного профіля штаби та епюри залишкових поздовжніх напруг, а також характеристик епюри і фактичної неплщинності. Причому поперечний профіль і епюра поздовжніх напружень (при застосуванні натягу - епюри питомого натягу) в деформованій штабі формуються в нерозривному взаємозв'язку одна від одної внаслідок взаємодії з осередком деформації, а характеристики фактичної неплщинності формуються остаточно лише після зняття зовнішнього навантаження (натягу) на достатній відстані від осередку пластичної деформації під дією поля залишкових поздовжніх напружень, що утворилося в штабі.

Механізм цієї взаємодії розглянуто на прикладі деформації штаби в довільній клітині  $j$  багатоклітинного прокатного стану.

Для стану холодної прокатування зробимо такі припущення: деформація в осередку плоска, поза осередком деформації - пружна; у штабі присутні тільки "приховані" класи неплщинності [12].

Процес гарячої прокатування, а також деякі окремі випадки холодної прокатування (наприклад, прокатування штаби з локальними потовщеннями, зміни умови змащення на вузьких, порівнянних із довжиною осередку деформації, ділянках штаби та ін.) погано узгоджуються з першим припущенням. Це буде враховано в загальноприйнятій формі в остаточному варіанті формули (див. нижче).

За аналогією з роботою [12] уявімо штабу у вигляді сукупності окремих поздовжніх перерізів, пружно пов'язаних між собою, які підкоряються поза

осередком деформації закону Гука. Правомірність такого підходу підтверджено результатами роботи [12 та ін.].

На рис. 3.1 наведено схему напружено-деформованого стану довільного поздовжнього перерізу штаби в  $j$ -й клітині багатоклітинного прокатного стану.

Зі схеми можна отримати співвідношення між зазначеними довжинами і товщинами (припустимо, що пружна деформація вздовж осі  $Y$  відсутня - поздовжні перерізи пружно взаємопов'язані):

### ***Вхід до клітині $j$***

$$\varepsilon_{j-1} = \frac{l_{j-1} - L_{j-1}}{L_{j-1}}, \text{ звідси } l_{j-1} = [1 + \varepsilon_{j-1}] \cdot L_{j-1},$$

$$\text{аналогічно } l_{j-1}(y) = [1 + \varepsilon_{j-1}(y)] L_{j-1}(y), \quad l_{j-1} = l_{j-1}(y),$$

$$L_{j-1} = \frac{1}{B} \int_0^B L_{j-1}(y) dy.$$

$$\varepsilon'_{j-1} = \frac{H_{j-1} - h_{j-1}}{H_{j-1}}, \text{ звідси } h_{j-1} = [1 - \varepsilon'_{j-1}] H_{j-1},$$

$$h_{j-1} = \frac{1}{b_{j-1}} \int_0^{b_{j-1}} h_{j-1}(y) dy.$$

### ***Вихід з клітині $j$***

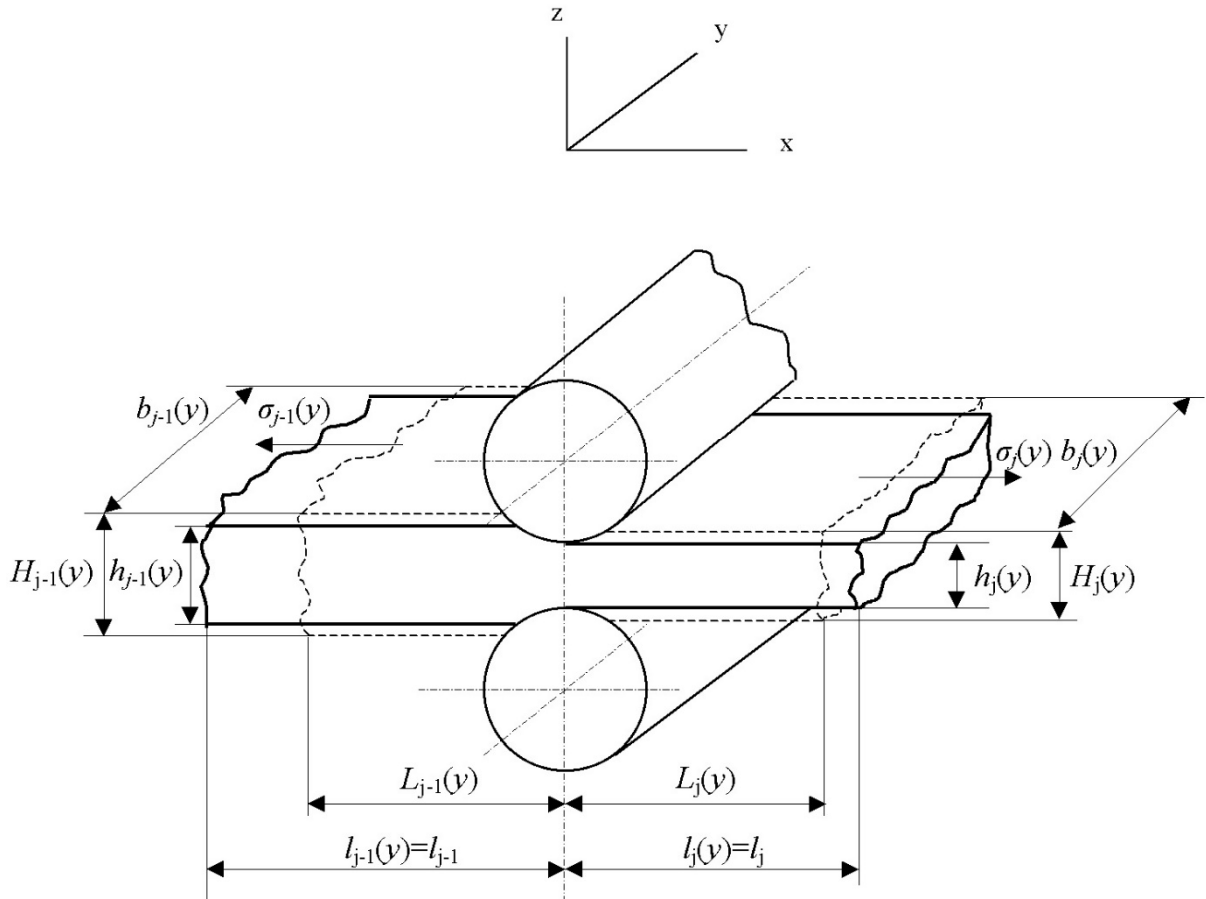
$$l_j = [1 + \varepsilon_j] \cdot L_j, \quad l_j(y) = [1 + \varepsilon_j(y)] \cdot L_j(y),$$

$$l_j = l_j(y),$$

$$L_j = \frac{1}{B} \int_0^B L_j(y) dy,$$

$$h_j = [1 - \varepsilon'_j] \cdot H_j, \quad h_j(y) = [1 - \varepsilon'_j(y)] \cdot H_j(y),$$

$$h_j = \frac{1}{b_j} \int_0^{b_j} h_j(y) dy,$$



**Рисунок 3.1** - Схема напружено-деформованого стану довільного перерізу штаби в  $j$ -й клітині багатоклітинаового стану холодної прокатування :

$x, y, z$  - осі координат, спрямовані за довжиною, шириною і товщиною штаби;  $H_{j-1}(y), H_j(y), h_{j-1}(y), h_j(y), L_{j-1}(y), L_j(y), l_{j-1}(y), l_j(y)$  - товщина і довжина кінцевого відрізка довільного перерізу на вході й виході клітині  $j$  у разі відсутності натягу та під натяжінням ;  $\sigma_{j-1}(y), \sigma_j(y)$  - питомий натяг перерізу штаби

де  $\varepsilon_{j-1}, \varepsilon_{j-1}(y), \varepsilon_j, \varepsilon_j(y)$  - відносні пружні подовження по осі  $X$  штаби і його поздовжнього перерізу під дією заднього  $T_{j-1}$  і переднього  $T_j$  натягу;

$\varepsilon'_{j-1}, \varepsilon'_{j-1}(y), \varepsilon'_j, \varepsilon'_j(y)$  - відносні пружні деформації (стиснення) за віссю  $Z$  штаби та її поздовжнього перерізу під дією натягу  $T_{j-1}$  і  $T_j$ , (утяжка);

$b_{j-1}(y)$ ,  $b_j(y)$  - ширина поздовжнього перерізу штаби на вході і виході з клітині  $j$ ;

$B$  - ширина штаби (причому  $b_{j-1}(y) \neq b_j(y)$ ).

Відповідно до умови сталості об'єму за необоротної деформації можна записати:

$$L_{j-1}H_{j-1} = L_jH_j, \quad L_{j-1}(y) \cdot H_{j-1}(y) \cdot b_{j-1}(y) = L_j(y) \cdot H_j(y) \cdot b_j(y)$$

звідси визначимо коефіцієнт витяжки для поздовжнього перерізу і штаби загалом:

$$\lambda_j = H_{j-1}/H_j = L_j/L_{j-1}; \quad (3.1)$$

$$\lambda_j(y) = L_j(y)/L_{j-1}(y) = H_{j-1}(y) \cdot b_{j-1}(y) / H_j(y) \cdot b_j(y).$$

З урахуванням наведених вище формул отримуємо:

$$\lambda_j(y) = \frac{H_{j-1}(y)b_{j-1}(y)}{H_j(y)b_j(y)} = \frac{h_{j-1}(y)[1 - \varepsilon'_j(y)]b_{j-1}(y)}{h_j(y)[1 - \varepsilon'_{j-1}(y)] \cdot b_j(y)}. \quad (3.2)$$

З іншого боку

$$\lambda_j(y) = \frac{L_j(y)}{L_{j-1}(y)} = \frac{l_j[1 + \varepsilon_{j-1}(y)]}{l_{j-1}[1 + \varepsilon_j(y)]} = \frac{L_j[1 + \varepsilon_j][1 + \varepsilon_{j-1}(y)]}{L_{j-1}[1 + \varepsilon_{j-1}][1 + \varepsilon_j(y)]}.$$

З урахуванням (3.1)

$$\lambda_j(y) = \frac{H_{j-1}[1 + \varepsilon_j][1 + \varepsilon_{j-1}(y)]}{H_j[1 + \varepsilon_{j-1}][1 + \varepsilon_j(y)]},$$

підставляючи замість  $H_{j-1}$  и  $H_j$  відповідно  $h_{j-1}/[1 - \varepsilon'_{j-1}]$  і  $h_j/[1 - \varepsilon'_j]$ , отримуємо:

$$\lambda_j(y) = \frac{h_{j-1}(y)[1 - \varepsilon'_j][1 + \varepsilon_j][1 + \varepsilon_{j-1}(y)]}{h_j(y)[1 - \varepsilon'_{j-1}][1 + \varepsilon_{j-1}][1 + \varepsilon_j(y)]}. \quad (3.3)$$

З формул (3.2) і (3.3) отримуємо



$$\frac{h_j(y) h_{j-1} b_j(y)}{h_{j-1}(y) h_j b_{j-1}(y)} = \frac{[1 - \varepsilon'_j(y)] [1 - \varepsilon'_{j-1}] [1 + \varepsilon_{j-1}] [1 + \varepsilon_j(y)]}{[1 - \varepsilon'_{j-1}(y)] [1 - \varepsilon'_j] [1 + \varepsilon_j] [1 + \varepsilon_{j-1}(y)]}. \quad (3.4)$$

Перетворимо праву частину рівняння (3.4), застосовуючи правило розкладання в степеневі ряди функцій типу  $(1 \pm x)^{-1} = 1 \mp x + x^2 \mp x^3 + x^4 \dots$  (при  $|x| \ll 1$ ), проведемо низку спрощень і замінь, які досить докладно проаналізовано в роботі [12]; у підсумку одержуємо формулу для розрахунку розподілу питомого натягу по ширині штаби на виході  $j$ -ї клітині прокатного стану:

$$\sigma_j(y) = E' \left[ \frac{h_j(y) h_{j-1} b_j(y)}{h_{j-1}(y) h_j b_{j-1}(y)} - 1 \right] + (\sigma_j - \sigma_{j-1}) + \sigma_{j-1}(y), \quad (3.5)$$

де  $E' = E/(1 + \nu)$ ,  $E$  - модуль Юнга,  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона;

$\sigma_{j-1}$ ,  $\sigma_j$  - середні значення питомих натягів по ширині штаби на вході та виході  $j$ -ої клітині;

$$\sigma_{j-1} = \frac{1}{B} \int_0^B \sigma_{j-1}(y) dy = \frac{T_{j-1}}{B h_{j-1}}, \quad \sigma_j = \frac{1}{B} \int_0^B \sigma_j(y) dy = \frac{T_j}{B h_j},$$

$\sigma_{j-1}(y)$ ,  $\sigma_j(y)$  - питомі натяги в поздовжньому перерізі на вході  $j$ -ї клітині;

$T_{j-1}$ ,  $T_j$  - загальний рівень (зусилля) натягу штаби.

Формулу (1.14) можна представити у відхиленнях:

$$\Delta \sigma_j(y) = E' \left[ \frac{h_j(y) h_{j-1} b_j(y)}{h_{j-1}(y) h_j b_{j-1}(y)} - 1 \right] + \Delta \sigma_{j-1}(y), \quad (3.6)$$

Позначимо відношення  $b_j(y)/b_{j-1}(y)$  через  $\beta$  і перепишемо формулу (3.6) у вигляді:

$$\Delta \sigma_j(y) = E' \left[ \beta \frac{h_j(y) h_{j-1}}{h_{j-1}(y) h_j} - 1 \right] + \Delta \sigma_{j-1}(y). \quad (3.7)$$

Величина коефіцієнту  $\beta$  може бути більшою за одиницю тільки в разі, коли ширина поздовжньої ділянки штаби, яку ми розглядаємо, порівнянна з довжиною осередку деформації. Приблизну оцінку величини  $\beta$  можна зробити, використовуючи відомі формули для розрахунку розширення штаби під час холодної прокатування. Не наводячи результатів досить простих обчислень, зазначимо, що з високим ступенем вірогідності коефіцієнт  $\beta$  лежить у межах від 1 до 1,2.

Більші значення коефіцієнту слід використовувати тільки у разі, коли створюються умови для локалізації пластичної деформації на окремих вузьких ділянках по ширині штаби та виникає сприятлива ситуація для поперечної течії металу (наявність локальних потовщень, локальне зношування валків, локальне розігрівання валків через засмічення сопел колектора, які подають охолоджувальну рідину, та ін.).

Аналіз формул (3.6) і (3.7) дав змогу виявити певні закономірності взаємодії натягів і поперечного профіля штаби. Зміна обтиску довільного поздовжнього перерізу призводить до відповідної зміни його товщини  $h_j(y)$  і, як наслідок цього, на цій ділянці змінюється натяг  $\sigma_j(y)$ .

Так збільшення обтиску призведе до зменшення  $h_j(y)$  і зменшення натягу як на вході клітині -  $\sigma_{j-1}(y)$ , так і на виході клітині  $\sigma_j(y)$ . У свою чергу через натяг  $\sigma_{j-1}(y)$  деформація передається в  $(j-1)$ -у клітина. Під час зменшення натягу на цій ділянці величина обтиснення зменшується і збільшується товщина поздовжнього перерізу  $h_{j-1}(y)$ . Тепер вже ця товщина піддається початковому більшому обтисненню, тобто збільшення обтиснення ніби компенсується відповідним збільшенням товщини. Менша величина натягу на виході  $j$ -ої клітині  $\sigma_j(y)$  перешкоджає збільшенню пластичної деформації (обтисненню) цієї ділянки штаби, тобто чинить протидію виникаючому впливу в  $j$ -ій клітині стану, тим самим сприяє збільшенню товщини  $h_j(y)$ .

Збільшення товщини  $h_j(y)$ , що відбувається внаслідок зменшення натягу і обтиснення, своєю чергою призводить до збільшення натягу  $\sigma_j(y)$ . У цьому полягає ефект "самовирівнювання" епюри питомих натягів у штабі під час

холодної прокатування на багатоклітинаовому стані. Ефект ґрунтується на дії "зворотного зв'язку" щодо натягу, який призводить до того, що поперечний профіль штаби в міру проходження штаби лінією стану залишається геометрично подібним до вихідного поперечного профіля підкату. З огляду на те, що передача збурення через натяг, як зазначалося вище, відбувається практично миттєво, то кожна зміна поперечного профіля штаби  $h_j(y)$  в  $j$ -ій клітині, яка спричиняє зміну епюр питомих натягнень  $\sigma_j(y)$ , в той самий момент часу нібито демпфується зміною епюри, що виникає. Ефект "самовирівнювання" епюри питомих натягів необхідно враховувати під час моделювання процесу формування площинності холоднокатаних штаб.

Ще один важливий висновок, який випливає з аналізу формул (3.6) і (3.7), полягає в тому, що еюра питомих натягнень в штабі на вході до  $j$ -ї клітині може не впливати на формування епюри питомих натягнень на виході  $j$ -ої клітині. Цей ефект пояснюється тим, що зміна епюри  $\sigma_{j-1}(y)$  викликається зміною поперечного профіля  $h_{j-1}(y)$ . У формулах ці величини дають протилежний ефект: зменшення  $h_{j-1}(y)$  призводить до зменшення величини  $\sigma_{j-1}(y)$ , яка своєю чергою компенсує початкове зменшення  $h_{j-1}(y)$ . Цей висновок неодноразово підтверджено результатами експериментальних досліджень [12].

Отримані уточнені формули спільно з описом осередку деформації та функцією зміни товщини штаби за шириною під дією верстатного, теплового профіля ванна валків, їхнього нерівномірного сплющування та вигинання склали замкнуту систему рівнянь, розв'язання якої наведено в роботі [12]. У цьому випадку під час побудови математичної моделі формування епюри залишкових поздовжніх напружень у холоднокатаній штабі (непрямої характеристики площинності) використано один із відомих підходів - структурну ідентифікацію. Однак під час аналізу отриманих результатів виявлено низький ступінь точності обчислень (помилка в деяких випадках перевищувала 200%), що не дає змоги часто не тільки кількісно, але навіть якісно прогнозувати площинність холоднокатаних штаб. Пов'язано це

насамперед із необхідністю забезпечення дуже високої точності під час розрахунків зміни поперечного профіля (порядок  $\sim 10^{-3}$ - $10^{-5}$  мм), що дуже важко порівняти з практичними даними. Тому видалося доцільним під час побудови моделі використовувати другий підхід - експериментальну (або параметричну) ідентифікацію, коли модель будується шляхом обробки результатів безпосередніх вимірювань. Тим паче, що сучасні прокатні стани оснащені доволі точними засобами контролю як функції відгуку (епюри питомих натягів), так і керуючих впливів (гідровигин та охолодження валків), і режиму прокатування .

Істотним недоліком цього підходу є обмеженість сфери застосування математичних моделей. Як правило, модель може використовуватися лише на досліджуваному об'єкті (у цьому разі - прокатному стані). Однак, точність, надійність, простота і можливість використання математичної моделі для управління часто набагато важливіші для дослідників і фахівців-прокатників. Як приклади в цьому розділі наведено математичні моделі процесів формування площинності штаб на станах холодної прокатування 1680 і 1400.

### ***Математична модель для неперервного стану 1680***

Математична модель формування епюри поздовжніх залишкових напружень у холоднокатаній штабі побудована з використанням експериментальної (параметричної) ідентифікації внаслідок опрацювання даних безпосередніх вимірювань епюри питомих натягів  $\sigma(y)$  (стресометр, 6,5-130 кН), зусилля гідровигину робочих валків  $F_r$  (манометр, 0-180 бар (1,8 МПа)), зусилля прокатування  $P$  (датчик Брандта, 0-30 МН), перекосу робочих валків у вертикальній площині  $\Delta P$  (датчик положення,  $-5,000 \div 5,000$  мм); швидкості прокатування  $V$  (тахометр, 0-33 м/с), натяжіння  $T$  (тензоролік, 0-800 кН), витрати ЗОР (змасувально-охолоджуюча рідина)  $\Delta Q$  (витратомір, 0-5385 л/хв), верстатного профіля ванна валків  $\Delta D$  (пасометр 0-10 мм).

Слід зазначити, що за наявності справно діючої вимірювальної системи (стресометр) необхідність у практичному застосуванні моделі відпадає. Однак,

в аварійних ситуаціях, у випадках несправності системи, у дослідницьких цілях тощо математична модель може слугувати ефективним інструментом для стабілізації технологічного процесу та отримання заданих епюр питомого натягу в холоднокатаних штабах.

Значення технологічних факторів і засобів регулювання площинності (ЗРП) 5-ї клітині стану під час експерименту змінювалися в таких діапазонах: товщина штаби  $h=0,5\div 1,5$  мм; ширина штаби  $B=1020\div 1650$  мм; гідровигин робочих валків  $F_{\Gamma} = -80\div +95\%$  ("-" - додатковий вигин, "+" - противигин); витрата ЗОР  $Q = -100\div +100\%$  ( $\Delta Q = \frac{Q_{кр} + Q_{пр}}{2} - Q_{ср}$ ,  $Q_{кр}$ ,  $Q_{пр}$ ,  $Q_{ср}$  - середні значення витрати охолоджувальної емульсії відповідно в крайній, проміжній і середній зоні розподільного колектора); зусилля прокатування  $P = 6\div 17$  МН; швидкість прокатування  $V=1\div 14$  м/с; натяг на моталці  $\sigma_m = 20\div 70$  МПа; сумарне верстатне профіля ванна робочих валків  $D = 0,20\div 0,70$  мм; перекис робочих валків у вертикальній площині  $\Delta P = -50\div +20$  % ( $\Delta P = P_{пр} - P_{об}$ ,  $P_{пр}$  и  $P_{об}$  - відносне положення ГНУ з боку приводу й обслуговування; 10 % зміни перекосу відповідають різниці зусиль із боку приводу й обслуговування  $\sim 60$  кН).

Для стислого цифрового представлення функцій відгуку - епюр питомого натягу  $\sigma(y)$  використовували методику, що ґрунтується на апроксимації їх із використанням поліномів Лежандра. Детально методику розглянуто в роботі [12].

За допомогою методу найменших квадратів (МНК) побудовано багатопараметричні залежності коефіцієнтів  $C_k$  апроксимації епюри питомих натягів холоднокатаної штаби від технологічних впливів, а також обрано їхню оптимальну форму шляхом включення до моделі значущих чинників та їхніх ефектів.

$$C_1 = 0,55 - 1,48 \cdot 10^{-4} \Delta P^3 + 0,74 \Delta P h \quad (3.8)$$

$$R = 0,75, F = 2,29, S_{ост} = 3,73.$$

$$C_2 = 14,987 + 1,76 \cdot 10^{-5} \Delta Q^3 - 3,79 \cdot 10^{-3} P^3 - 6,90 \cdot 10^{-2} V^2 + \quad (3.9)$$

$$+ 2,04 \cdot 10^{-2} F V + 1,86 \cdot 10^{-2} \Delta Q P,$$

$$R=0,86, F=3,97, S_{\text{ост}}=8,33.$$

$$C_3=-1,12 + 2,79h + 1,25 \cdot 10^{-4} \Delta P^3 - 0,62 \Delta P h,$$

$$R=0,58, F=1,52, S_{\text{ост}}=4,99;$$

$$C_4=-8,67 + 3,93 \cdot 10^{-3} V^3 - 6,57 \cdot 10^{-3} \Delta Q V + 3,44 \cdot 10^{-3} F P,$$

$$R=0,64, F=1,69, S_{\text{ост}}=6,62.$$

(3.10)

(3.11)

Таким чином, розподіл питомих натягів по ширині штаби можна оцінювати за такою залежністю

$$\sigma_{\text{хол}}(y) = \sum_{k=1}^6 C_k P_k(x_i) + \sigma_m, \quad (3.12)$$

де  $y$  - координата по ширині штаби;

$P_k(x_i)$  - поліноми Лежандра;

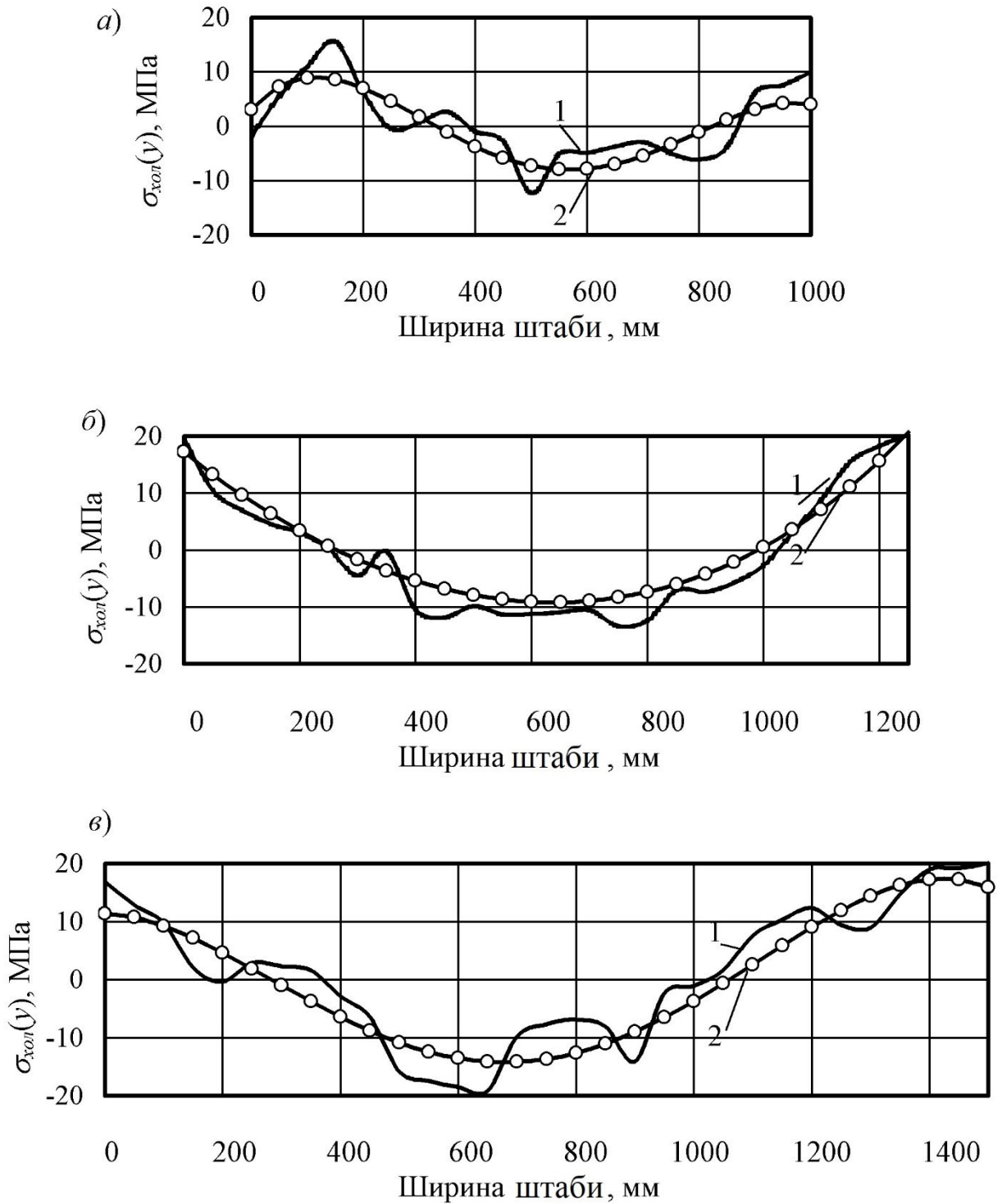
$\sigma_m$  - середній питомий натяг штаби на моталці, МПа;

$x_i$  - точки місць розташування датчиків вимірювання натягу під час нормування ширини штаби до відрізка  $[-1,1]$ ,  $x_i = -1 + i \cdot 2/n$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ .

### **Приклад**

На рис. 3.2 показано виміряні та розраховані епюри питомих натягів у холоднокатаних штабах зі сталі марки 08Ю різних розмірів. Значення технологічних факторів і результати розрахунку за формулами (3.8) - (3.12) наведено в табл. 3.1. Середня помилка між виміряними і розрахованими епюрами питомих натягу в холоднокатаних штабах не перевищує 8%, що свідчить про адекватність рівнянь (3.8) - (3.12) і надійність використовуваної методики цифрового представлення розподілених величин.

Під час аналізу експериментальних даних на стані 1680 середній питомий натяг штаби і значення верстатного профіля ванна опорних валків були виключені з подальшого розгляду з огляду на те, що в процесі прокатування ці параметри мали фіксовані значення.



**Рисунок 3.2** - Виміряні та розраховані епюри питомих натягів у холоднокатаних штабах для стану 1680:

1 - виміряна епюра,

2 - розрахована епюра

**Таблиця 3.1** - Результати розрахунку за формулами (3.8) - (3.12)

На рис · 3.2	$h$ , мм	$B$ , мм	$F_r$ , %	$\Delta Q$ , %	$P$ , МН	$V$ , м/с	$\Delta P$ , %	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
<i>a</i>	0,64	1020	40	-33,79	7,83	4,50	-10	-4,04	9,84	4,51	-6,24
<i>б</i>	0,82	1240	85	-24,62	8,87	10,62	0	0,55	18,65	1,17	0,35
<i>в</i>	0,7	1480	28	57,17	14,69	8,93	11	6,05	21,48	-3,77	-7,81

### *Математична модель для неперервного стану 1400*

Діапазон і похибка вимірювань для досліджуваних впливів становили: епюра питомих натягу ( $y$ ), 2-150 кН (стресометричний ролик); гідровигину робочих валків  $F$  - додатковий вигин 0-165 бар (0-100%), противигин 70-165 бар (0-100%), 1,5% (манометр); зусилля прокатування  $P$ , 0-26 МН, 1% (прилад Kelk1400); швидкість прокатування  $V$ , 0-900 м/хв, 1 м/хв (імпульсні датчики); натяг штаби 0-0,3 МН, 1% (тензометр ASEA); товщина штаби  $h$ , 0,25-3,5 мм, 0,2% (мікрометр FH-46K); верстатне профіля ванна робочих валків  $D$ , 0-10 мм, 0,01 мм (пасометр).

Діапазон зміни значень технологічних факторів і СРП 4-ї клітині стану був такий: товщина штаби  $h = 0,4 \div 1,0$  мм; ширина штаби  $B = 1000 \div 1250$  мм; гідровигин робочих валків  $F_r = -40 \div +30\%$ ; зусилля прокатування  $P = 4 \div 12$  МН; швидкість прокатування  $V = 6 \div 14$  м/с; натяг на моталці  $\sigma_m = 30 \div 120$  МПа; перекіс робочих валків у вертикальній площині  $\Delta P = -0,504 \div -0,037$  МН ( $\Delta P = P_{np} - P_{ob}$ ,  $P_{np}$  и  $P_{ob}$  - зусилля ГНУ з боку приводу та обслуговування). Витрату ЗОР у всіх зонах розподільного колектора встановлювали на максимальний рівень і під час експерименту не варіювали.



Нижче наведено багатопараметричні залежності коефіцієнтів  $C_k$  від технологічних впливів в оптимальній формі, побудовані за допомогою МНК.

$$C_1 = -0,4108 + 18,7387 h^4 - 3,6514P + 0,0015 P^4 - 12,5026 h\Delta P$$

$$R=0,87, F=4,11, S_{\text{ост}}=5,9. \quad (3.13)$$

$$C_2 = 24,93 + 2,97 \cdot 10^{-4} F^3 - 3,04 \cdot 10^{-3} P^4 + 0,4754 P V - 1,46 \cdot 10^{-3} V^4,$$

$$R=0,86, F=3,84, S_{\text{ост}}=15,14. \quad (3.14)$$

$$C_3 = -76,89 - 0,00129 P^4 + 51,5368 \ln P + 48,6638 h\Delta P,$$

$$R=0,83, F=3,21, S_{\text{ост}}=9,58; \quad (3.15)$$

$$C_4 = -11,2599 + 1,8255P^2 + 0,0985V^3 - 2,57 \cdot 10^{-4} F^3 - 3,3902VP,$$

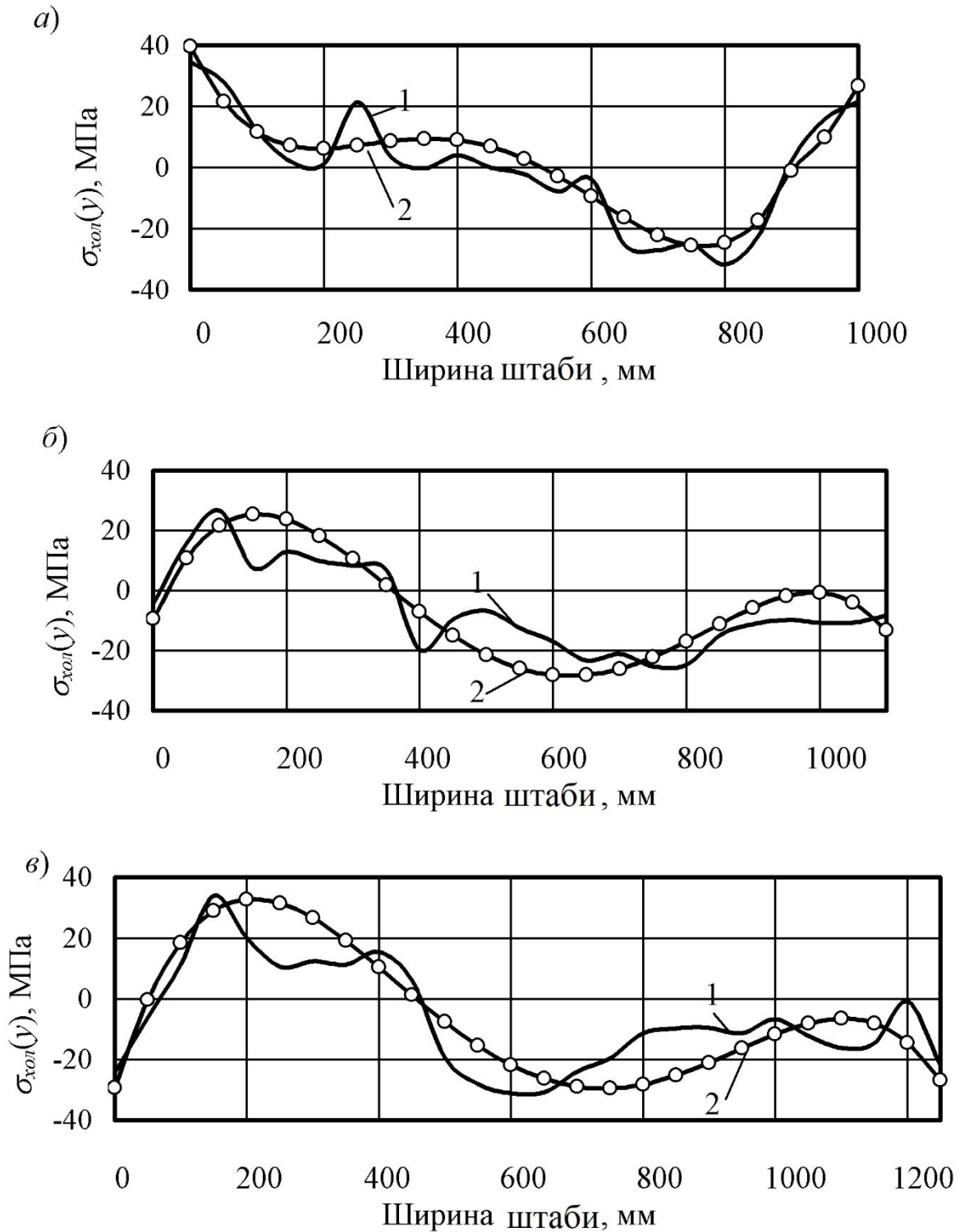
$$R=0,85, F=3,60, S_{\text{ост}}=11,36. \quad (3.16)$$

### **Приклад**

На рис. 3.3 показано виміряні та розраховані епюри питомих натягів у холоднокатаних штабах зі сталі марки 08Ю різних розмірів. Значення технологічних факторів і результати розрахунку за формулами (3.13) - (3.16) наведено в табл. 3.2. Середня помилка між виміряними і розрахованими епюрами питомих натягів у холоднокатаних штабах не перевищує 10%.

**Таблиця 3.2** - Результати розрахунку за формулами (3.13) - (3.16)

На рис. 3.3	$h$ , мм	$B$ , мм	$F_r$ , %	$P$ , МН	$V$ , м/с	$\Delta P$ , %	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$
<i>a</i>	0,5	1000	8,62	6,38	13,845	-0,159	-19,06	8,43	12,61	24,83
<i>б</i>	0,7	1100	-12,75	6,51	12,59	-0,09	-16,20	21,14	14,27	-14,65
<i>в</i>	0,4	1250	-30,05	8,75	12,908	-0,204	-22,07	12,21	23,36	-35,50



**Рисунок 3.3** - Виміряні та розраховані епюри питомих натягів у холоднокатаних штабах для стану 1400:

1 - виміряна епюра, 2 - розрахована епюра

### 3.2 Математична модель прогнозування нерівномірності механічних властивостей в металі

Запропоновано практичну методику оцінки та прогнозування нерівномірності властивостей за довжиною і шириною холоднокатаних штаб. Методика передбачає використання допоміжних показників якості, які вимірюються в потоці виробництва і корельовані (мають тісний зв'язок) з регламентованими властивостями готової продукції. Вона ґрунтується на наявному взаємозв'язку механічних властивостей металів із залишковими напруженнями, що виникають у штабі внаслідок нерівномірності пластичної деформації під час обробки тиском (прокатування, термообробка - нагрівання й охолодження тощо) [12].

Контроль і кількісна оцінка механічних властивостей за довжиною і шириною штаб здійснюється за розподілом внутрішніх залишкових поздовжніх напруг, що досить точно відображається епюрою питомих натягів в холоднокатаній штабі (покажемо на прикладі межі плинності -  $\sigma_T$ ).

Експериментально визначають коефіцієнти залежності відхилення межі плинності від середнього значення в  $j$ -му перерізі по довжині та  $i$ -му перерізі по ширині штаби від залишкових поздовжніх напружень:

$$\Delta\sigma_{Tji} = B + C\Delta\sigma_{ji}, \quad (3.17)$$

де  $\Delta\sigma_{Tji}$  – відхилення межі плинності від середнього значення в  $j$ -му перерізі по довжині та  $i$ -му перерізі по ширині штаби;

$B, C$  - коефіцієнти, що враховують марку сталі;

$\Delta\sigma_{ji}$  – епюра питомих натягів у  $j$ -му перерізі.

Епюра питомих натягів в  $j$ -х перерізах ( $\Delta\sigma_{ji}$ ) вимірюється на виході стану за допомогою стресометричного ролика. Відхилення механічних властивостей від середнього значення і середній рівень механічних властивостей по ширині штаби визначають на основі опрацювання результатів лабораторних механічних випробувань зразків, на які розпускають штаби за

довжиною і шириною відповідно до координат вимірювань епюри питомих натягів.

Далі визначається межа плинності штаби по її довжині та ширині за формулою:

$$\sigma_{Tji} = \hat{\sigma}_{Tj} + \Delta\sigma_{Tji}. \quad (3.18)$$

Нижче наведено приклад реалізації запропонованого способу.

Під час обробки штаб зі сталі марки 08Ю типорозміру 0,7×1300 мм (стан 1680 нескінченної холодної прокатування КОМБІНАТУ «Запоріжсталь») експериментальним шляхом було отримано середній рівень і розподіл механічних властивостей за шириною штаби. Карту розрізали на окремі зразки за шириною штаби і вимірювали механічні властивості для кожного зразка.

Експериментальним шляхом було отримано формулу для розрахунку відхилення межі плинності від середнього значення:

$$\Delta\sigma_{Tji} = -0,58 + 0,50\Delta\sigma_{ji}. \quad (3.19)$$

Отримане рівняння має досить високі оцінки адекватності:  $r = 0,93$ ,  $r = 0,93$ ,  $S^2_{ост} = 0,32$ ,  $F = 6,93$ .

За виміряною епюрою залишкових напружень у штабі (рис.3.4), визначено відхилення межі плинності для готового прокату (рис.3.5).

На рис. 3.6 наведено розраховані (а) і виміряні (б) розподіли межі плинності за шириною штаби.

На рис. 3.7 наведено епюру залишкових напружень у штабі, виміряну на відстані 1500 м від переднього кінця штаби.

На рис. 3.8 наведено розраховані відхилення межі плинності по ширині штаби на відстані 1500 м від переднього кінця штаби.

На рис. 3.9 наведено розраховані (а) і виміряні (б) розподіли межі плинності за шириною штаби на відстані 1500 м від переднього кінця штаби.

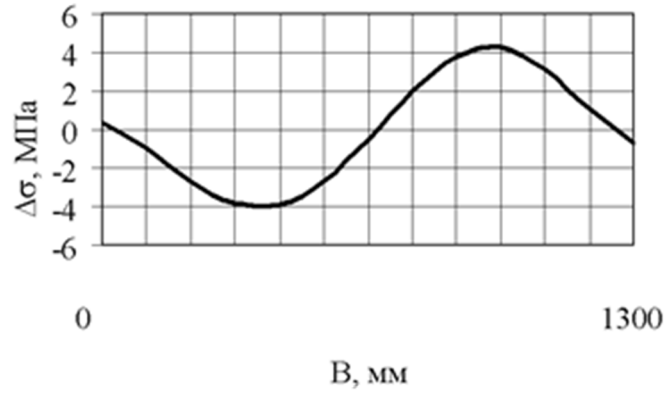


Рисунок 3.4 - Епюра залишкових поздовжніх напружень

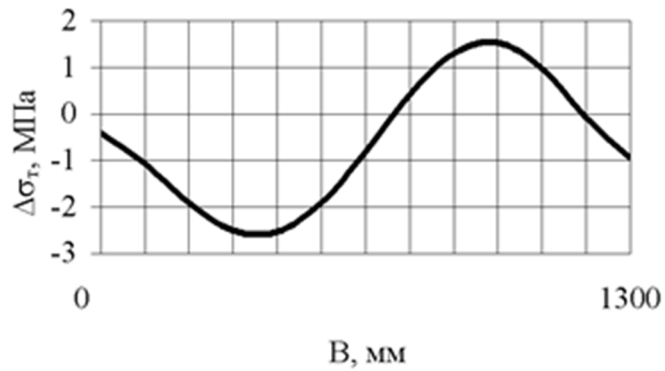
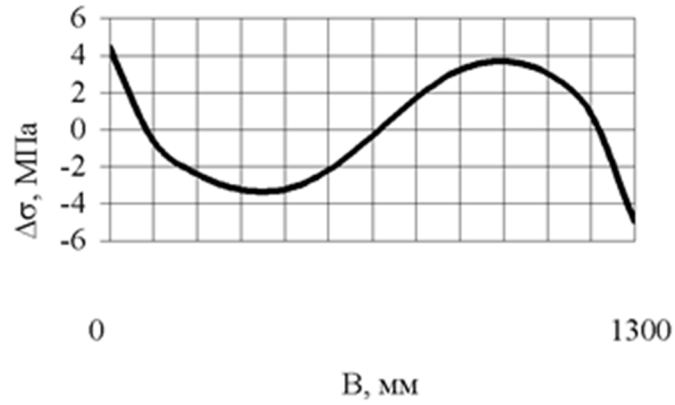


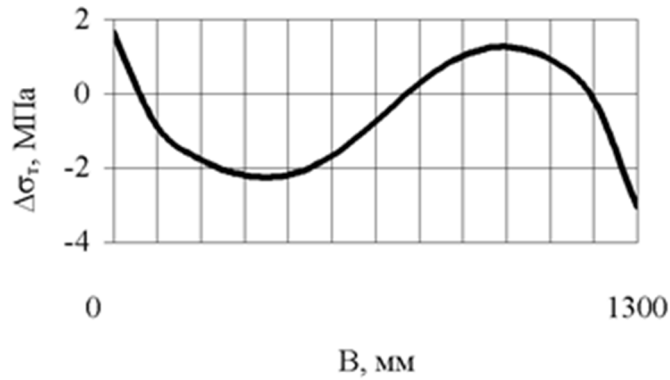
Рисунок 3.5 - Відхилення межі плинності для готового прокату



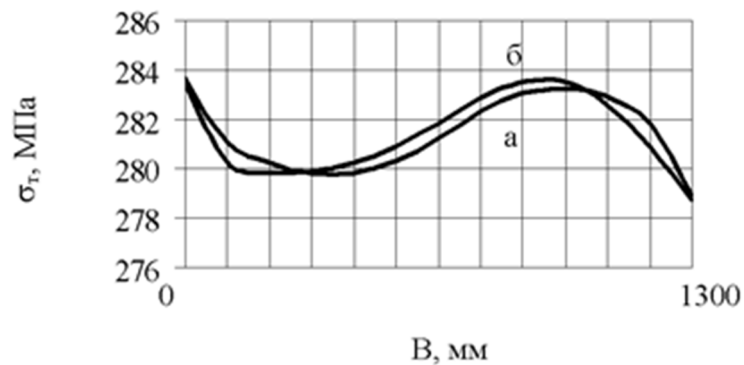
Рисунок 3.6 - Розподіл межі плинності по ширині штаби  
розраховані (а) і виміряні (б).



**Рисунок 3.7** - Епюра залишкових поздовжніх напружень, виміряна на відстані 1500 м від переднього кінця штаби.



**Рисунок 3.8** - Відхилення межі плинності по ширині штаби на відстані 1500 м від переднього кінця штаби.



**Рисунок 3.9** - Розраховані (а) і виміряні (б) розподіли межі плинності по ширині штаби на відстані 1500 м від переднього кінця штаби.

Результати роботи підтвердили наявність зв'язку між механічними властивостями та залишковими поздовжніми і поперечними напруженнями, що дає змогу за рівнем і характером розподілу залишкових поздовжніх і поперечних напружень у штабі визначити рівень і характер розподілу механічних властивостей у тонколистовому прокаті.

Таким чином, отримані матеріали допоможуть на практиці розв'язати одне з найважливіших завдань - адекватного контролю та оцінки ступеня мінливості властивостей металу за довжиною і шириною штаб, що зі свого боку дасть змогу відвантажувати готову продукцію строго відповідно до вимог кожного замовника.

## **4 МЕХАНІЧНА ЧАСТИНА**

### **4.1 Розрахунок валків листопрокатного стану на міцність і деформацію у програмному комплексі AutoCAD Mechanical**

#### **4.1.1 Вступ**

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

Питанню автоматизації комп'ютерного моделювання присвячена значна кількість робіт [16-20]. Розглядаються можливості автоматизації графічного моделювання в AutoCAD Mechanical, КОМПАС-3D, ABAQUS, Autodesk Inventor 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 ручними способами. На базі функціональних вимог до виробу, системи САПР надаючи можливість економити час проектувальника, автоматично створюють інтелектуальні компоненти, дозволяють здійснювати перевірку моделей без випробування дослідних зразків.

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



#### 4.1.2 Постановка задачі дослідження

Метою роботи є дослідження можливості геометричного моделювання валків прокатних станів і виконання розрахунків на міцність і деформацію в програмному комплексі AutoCAD Mechanical 2021 [20].

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

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

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma} \geq [n] \text{ або } n = \frac{\tau_B}{\tau} \geq [n], \quad (4.1)$$

де  $\sigma_B$  і  $\tau_B$  – межа міцності матеріалу валка за нормальними і дотичними напруженнями, (в розрахунках приймають  $\tau_B = 0,7 \cdot \sigma_B$ ), МПа;

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

Допустиме значення коефіцієнту запасу міцності для усіх деталей прокатної клітини, окрім станини, приймають рівним 5, а для станини, як найбільш відповідального елемента конструкції прокатного стану – 10 [5].

Напруження згинання в бочці валка визначають за формулою [5]:

$$\sigma_{\text{згин}} = M_{\text{згин}}/W_{\delta} = M_{\text{згин}}/(0,1D^3) \quad (4.2)$$

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

$W_{\delta}$  – момент опору поперечного перетину бочки валка на вигин, м<sup>3</sup>;

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

### 4.1.3 Методика дослідження

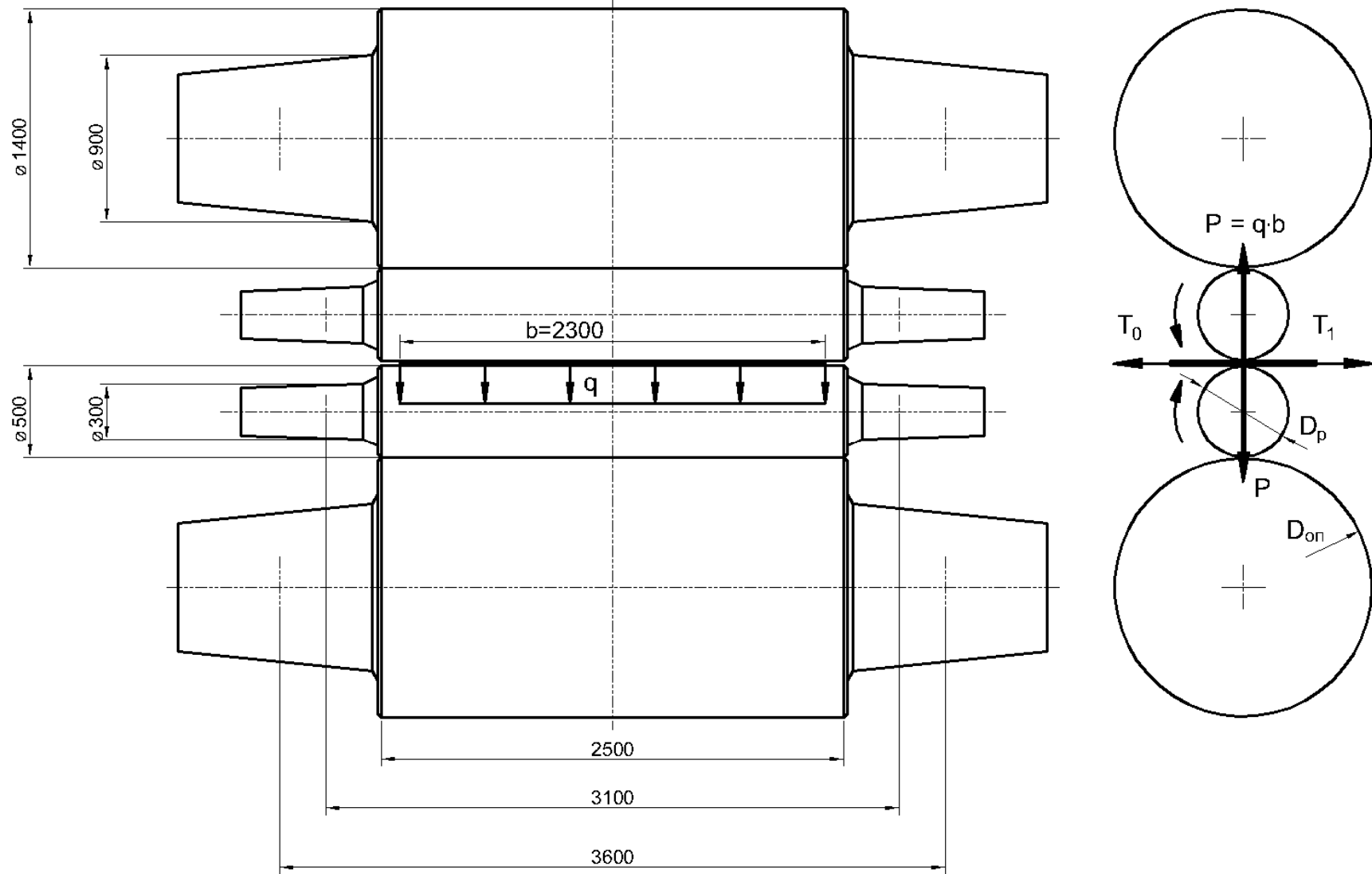
В AutoCAD Mechanical 2021 можливо виконувати розрахунки валів, використовуючи контур, створений за допомогою генератора валів, або будь-який інший симетричний контур валу. Функція забезпечує статичний розрахунок, який має велике значення для розрахунку навантаження на вал і підшипники кочення або ковзання.

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

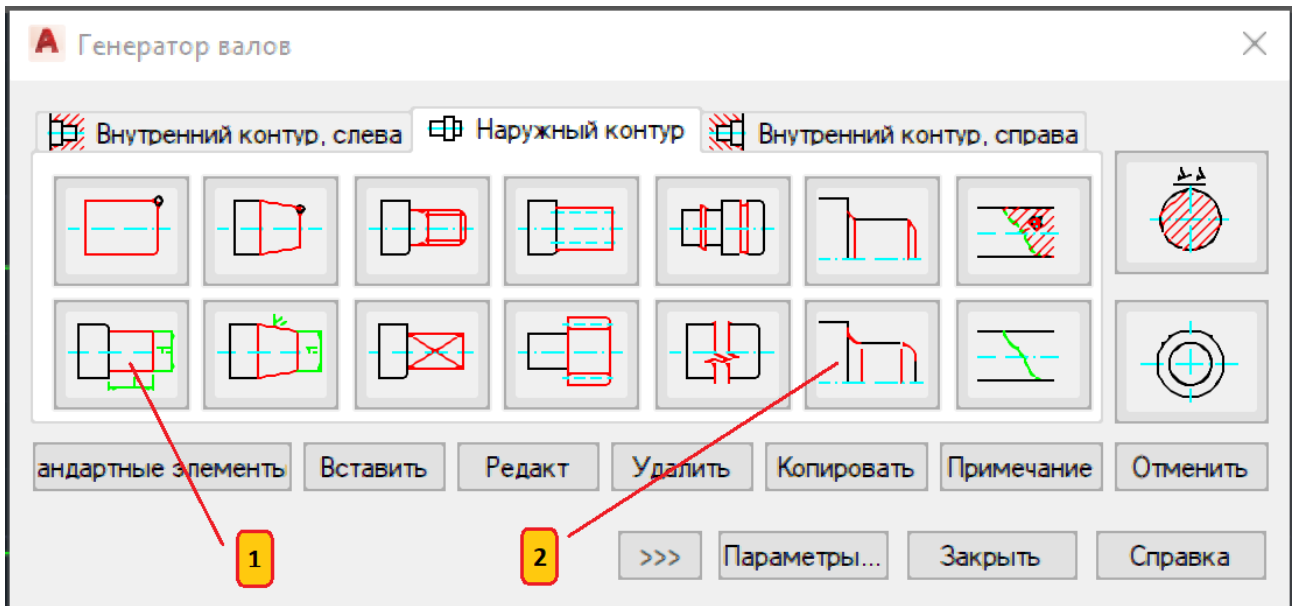
Створимо розрахункову модель і виконаємо розрахунок на деформацію і міцність робочих і опорних валків чотирьохвалкової клітини стану 550/1500/2500 для холодного прокатування штаб, використовуючи такі ж вихідні дані, як в прикладі 17 [5, стор. 108].

Розрахункова схема валків клітини кварто із зазначенням навантажень і розмірів приведена на рис. 4.1. Оскільки навантаження на опорний і робочий валки різні, то розрахунки проводимо окремо для робочого і опорного валка.

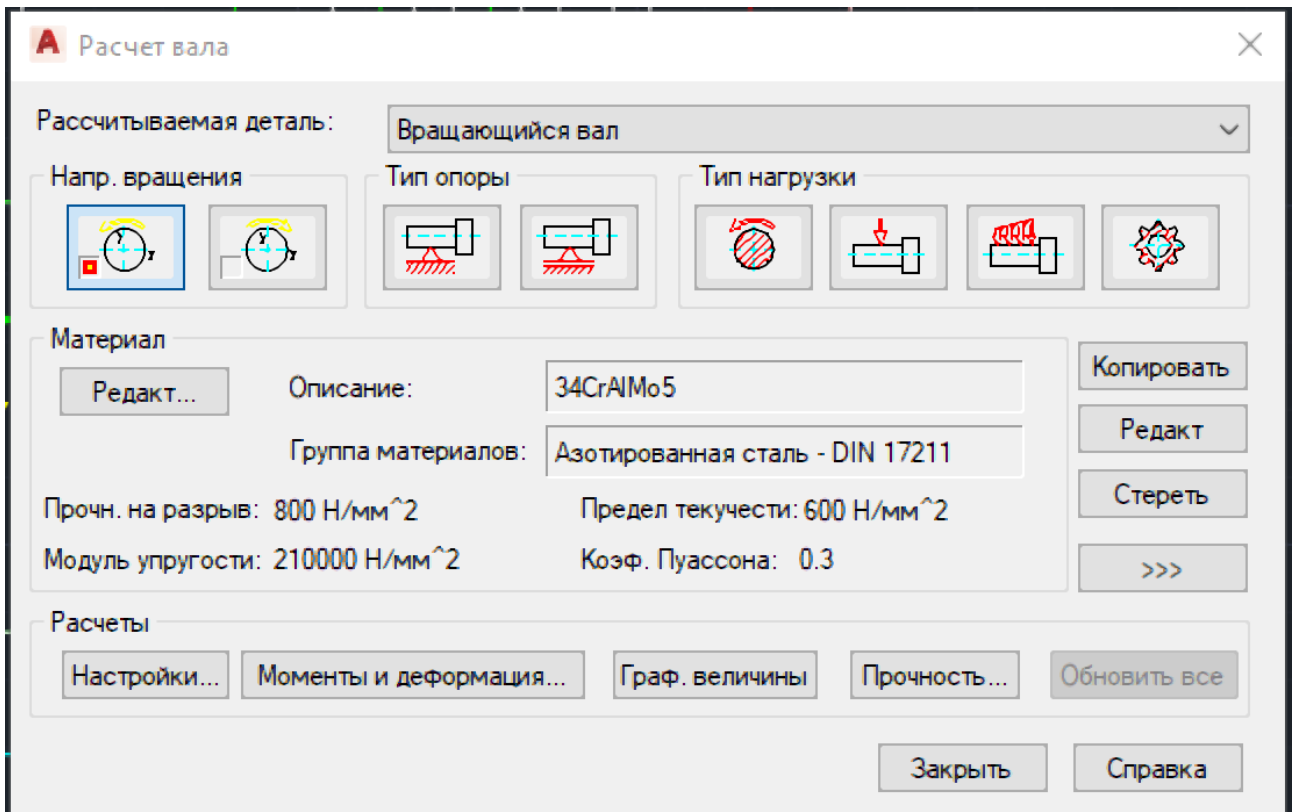
На першому етапі рішення задачі по схемі на рис. 4.1 (або по компоновальному кресленню) виконується 2D модель валка за допомогою генератора валів AutoCAD Mechanical. Перед виконанням будь-яких розрахунків на валку необхідно створити його контур. На рис. 4.2 (а) наведено діалогове вікно «Генератор валів». За допомогою кнопки 1 будують гладкі циліндричні ділянки валка за заданими діаметрами і довжинами. Потім за допомогою кнопки 2 добавляються галтелі.



**Рисунок 4.1** - Схема для розрахунку валків клітини кварто на деформацію і міцність



а



б

Рисунок 4.2 - Диалогові вікна «Генератор валів» (а) і «Розрахунок валу» (б)

На другому етапі (після створення контура валка) за допомогою діалогового вікна "Розрахунок валу" (рис. 4.2 б) виконується розрахунок. Вихідними даними для розрахунку валка є: момент крутіння на робочому валку, матеріал валка, сили, що діють на валок у горизонтальній і вертикальній площині.

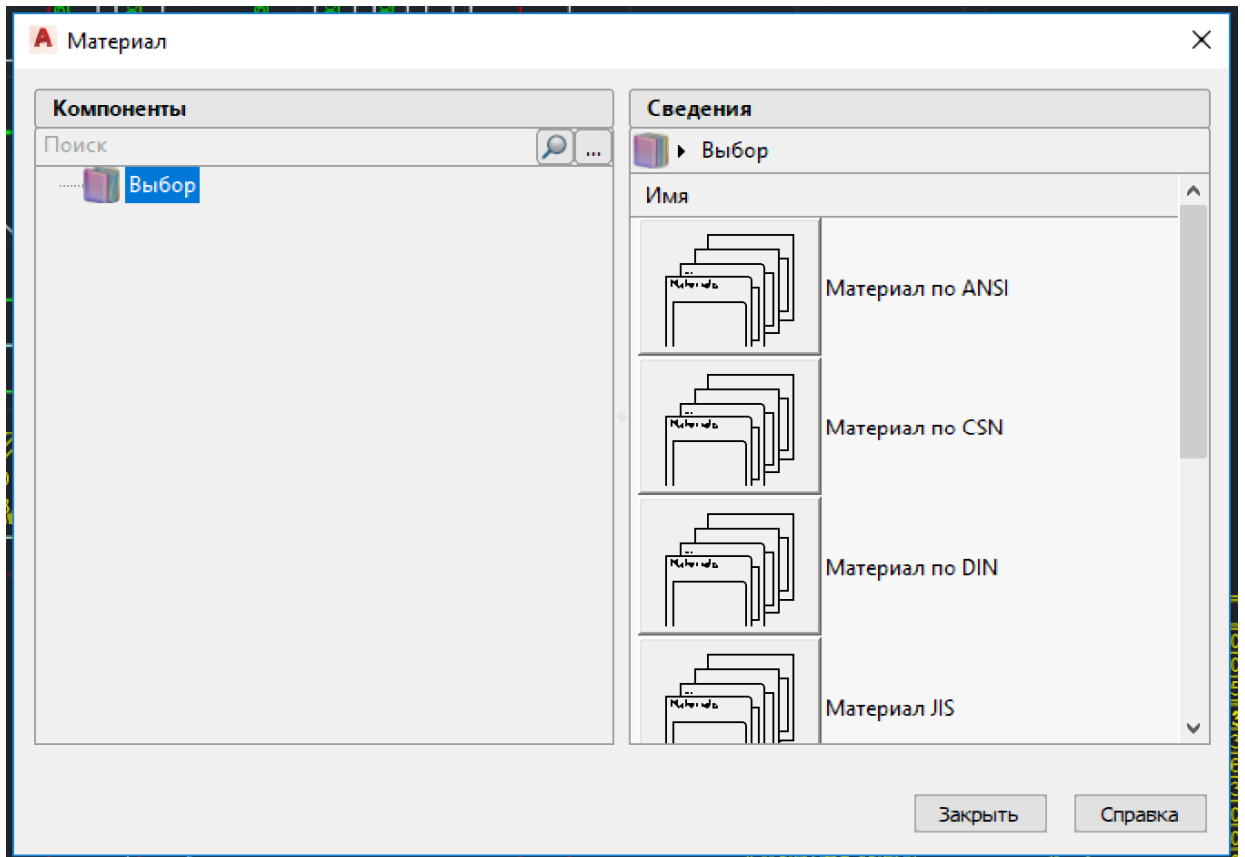
Матеріал валка вибирають за допомогою опції «Редагувати». Відкривається діалогове вікно «Матеріал» (рис. 4.3 а), в якому вибирається стандарт матеріалу. У нашому розрахунку вибирається німецький стандарт DIN. Виводиться вікно з різноманітними марками сталей і інших металів і сплавів (рис. 4.3 б). Ми вибираємо сталь 34CrAlMo5 (аналог вуглецевої сталі 9Х2 і 9ХФ з підвищеним вмістом хрому і марганцю), який має межу текучості  $\sigma_T = 600$  МПа і межу міцності  $\sigma_B = 800$  МПа.

Виводиться діалогове вікно вибору властивостей матеріалу валка (рис. 4.4), в якому можна відредагувати вид термомеханічної обробки, показники міцності тощо.

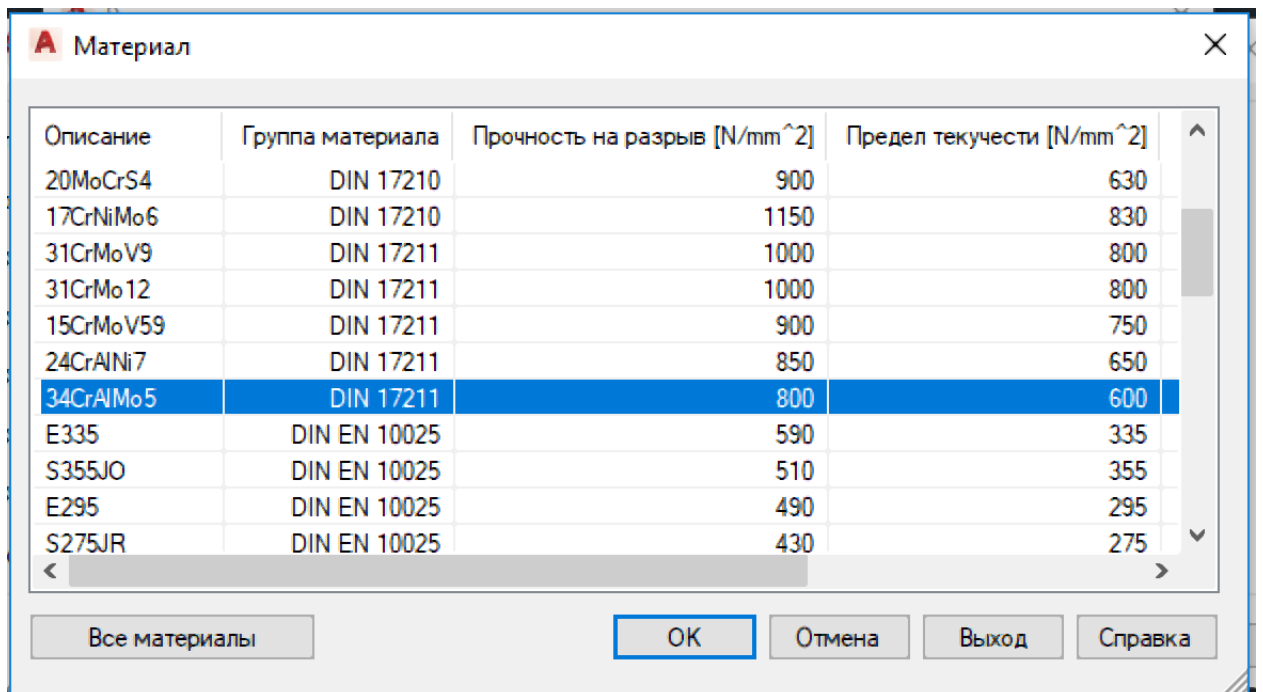
Після цього вибирається тип опори (рис. 4.2 б) і місце їх розташування на валку. Визначаються корисні навантаження. В AutoCAD Mechanical 2021 при розрахунку навантаження використовується геометрія креслення. У нашому прикладі навантаження є розподіленим по ширині штаби (рис. 4.1 і 4.5 б), але може використовуватись і крапкове, зосереджене навантаження (рис. 4.5 а). Вказується крутний момент на валку (рис. 4.5 в) і результат побудови розрахункової схеми виглядає так, як показано на рис. 4.6 і 4.7.

На заключному етапі проектування валка в AutoCAD Mechanical 2021 виконується робоче креслення з виносними елементами, проставляються позначення, розміри, допуски тощо.

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



а



б

Рисунок 4.3 - Диалогові вікна вибору матеріалу валка

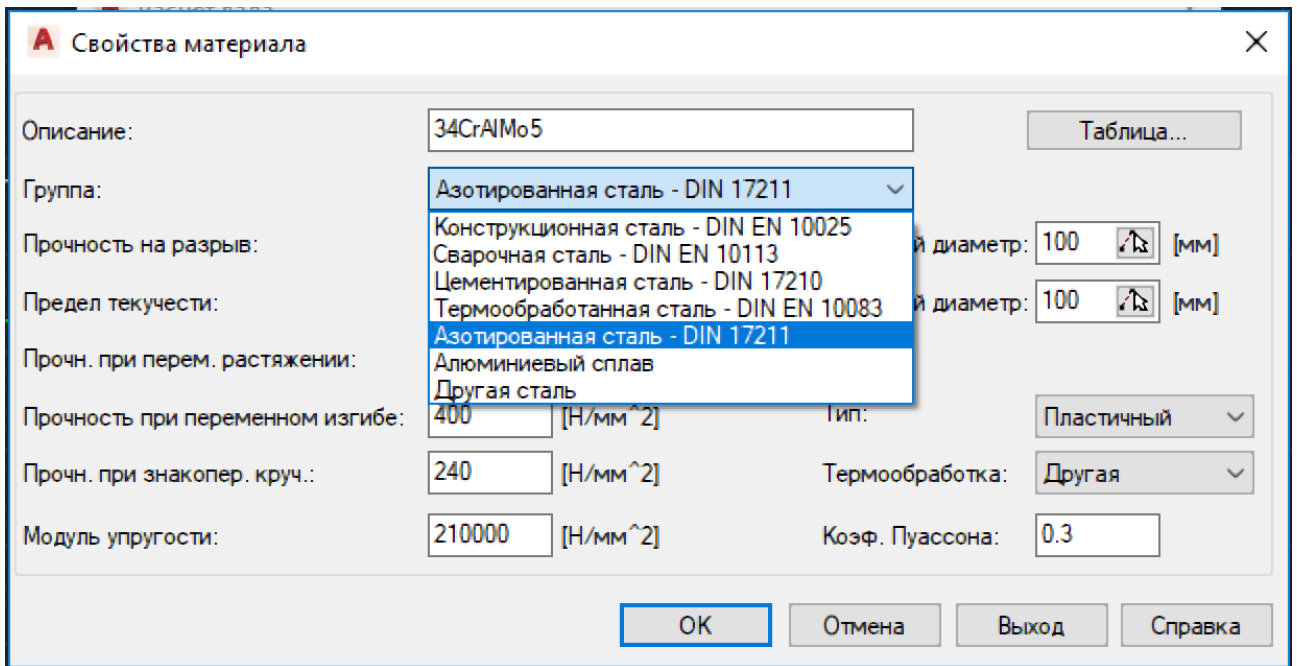
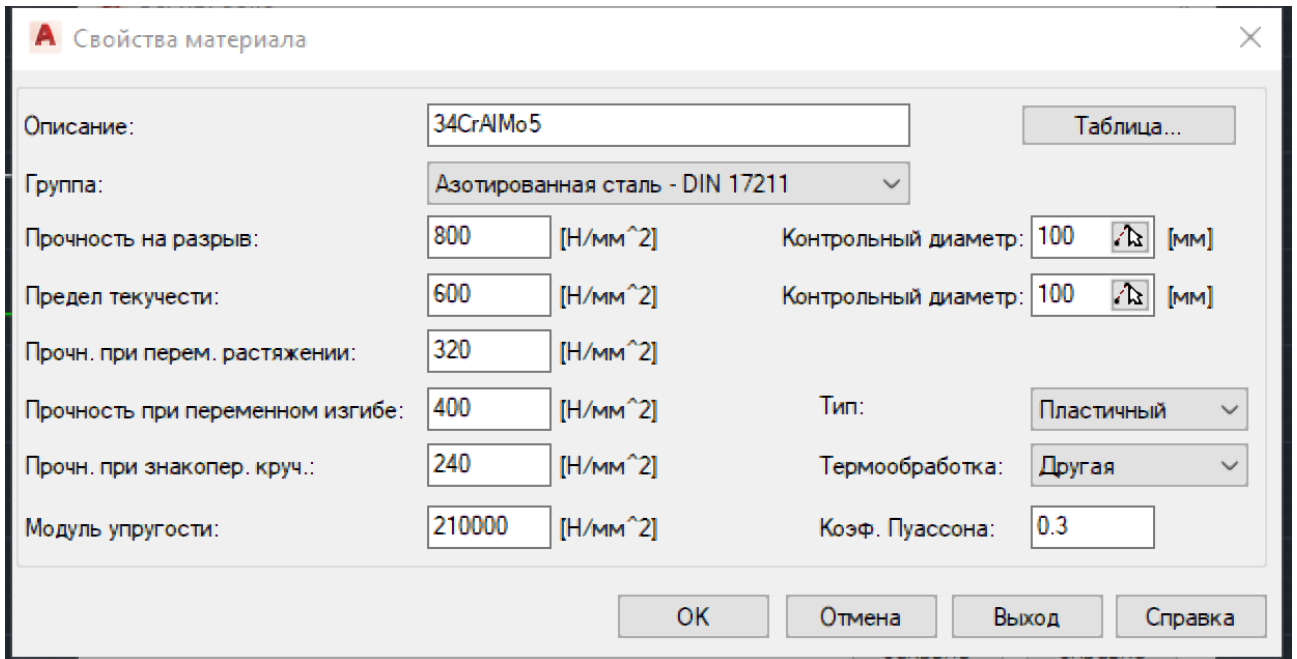
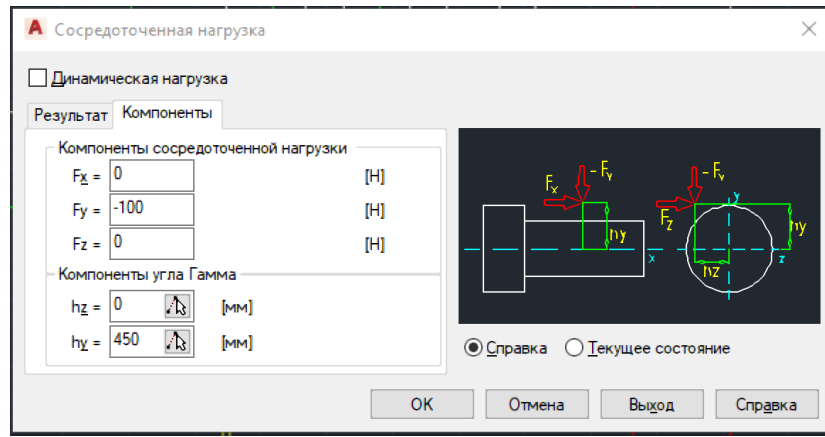
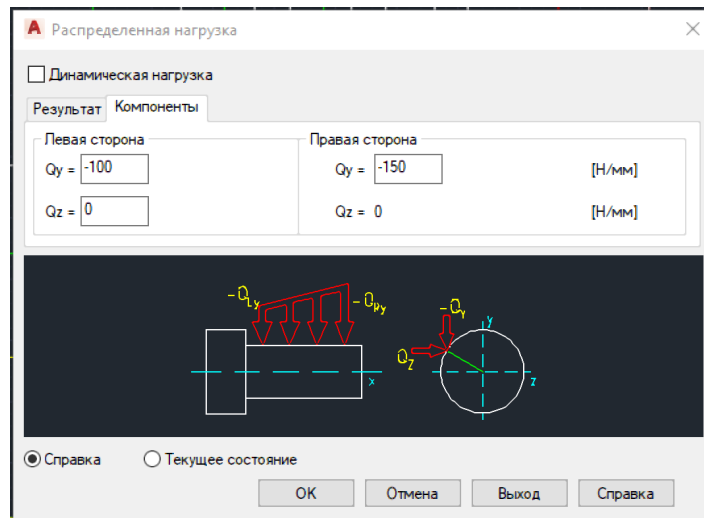


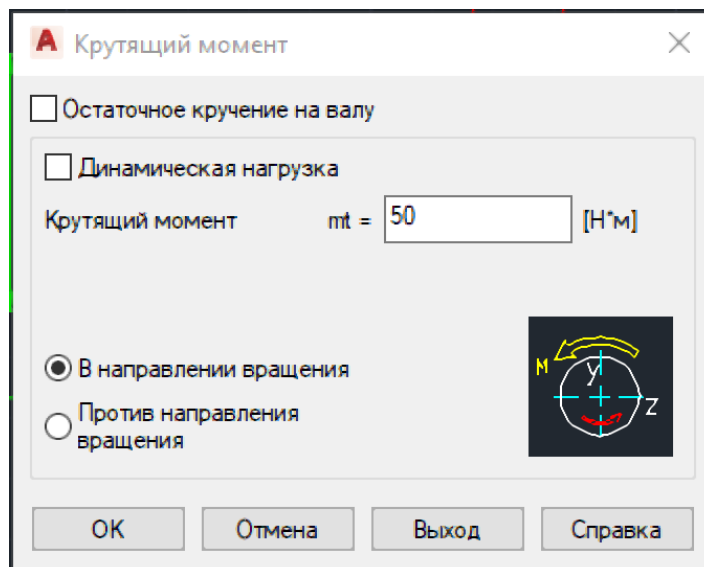
Рисунок 4.4 – Диалогові вікна вибору властивостей матеріалу валка



а



б



в

**Рисунок 4.5** – Типы навантажень на валок:

а – зосереджене; б – розподілене; в – крутний момент



#### 4.1.4 Результати досліджень

Результати розрахунків робочого і опорного валка представлені відповідно на рисунках 4.6 і 4.7. За отриманими епюрами визначаються небезпечні перетини валка – по середині бочки і в шийці валка по галтелі (у місці з'єднання бочки і шийки валка). При необхідності уточнюється геометрія валка. При цьому генератор валів автоматично перераховує всі дані. На завершальному етапі виконується креслення валка.

Порівнюючи розрахункові дані, приведені в літературі з обчисленими значеннями в AutoCAD Mechanical 2021 можна зробити висновок, що вони мають близькі значення. Так коефіцієнт запасу статичної міцності **по межі текучості** для опорного валка (крутний момент відсутній) дорівнює 5,3 (рис. 4.7), а в літературі [5] в перетині 1-1 – 5,2. У шийці робочого валка визначений тільки запас міцності при крученні  $n_{\tau} = 6,8$  [5]; за нашими даними коефіцієнт запасу міцності з урахуванням вигину і кручення дорівнює  $n_{ш}^p = 4,4$  (рис. 4.6), що також достатньо [5, стор. 109]. При сумісній дії вигину і кручення сумарне (еквівалентне) напруження в шийці для сталевих валків визначається по формулі (дані узяті на рис. 4.6):

$$\sigma_{\text{екв.ш}}^p = \sqrt{\sigma_{\text{из.ш}}^2 + 3 \cdot \tau_{\text{кр.ш}}^2} = \sqrt{21,2^2 + 3 \cdot 78,4^2} = 137,4 \text{ МПа.}$$

$$n_{ш}^p = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\text{екв.ш}}^p} = \frac{600}{137,4} = 4,4.$$

Визначимо розрахункові коефіцієнти запасу міцності **по межі міцності**, використовуючи розрахункові донні на рис. 4.6 і 4.7 і формулу (4.1):

$$\text{у бочці опорного валка: } n_6^{\text{оп}} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\text{из.б}}^{\text{оп}}} = \frac{800}{78,3} = 10,2,$$

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

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

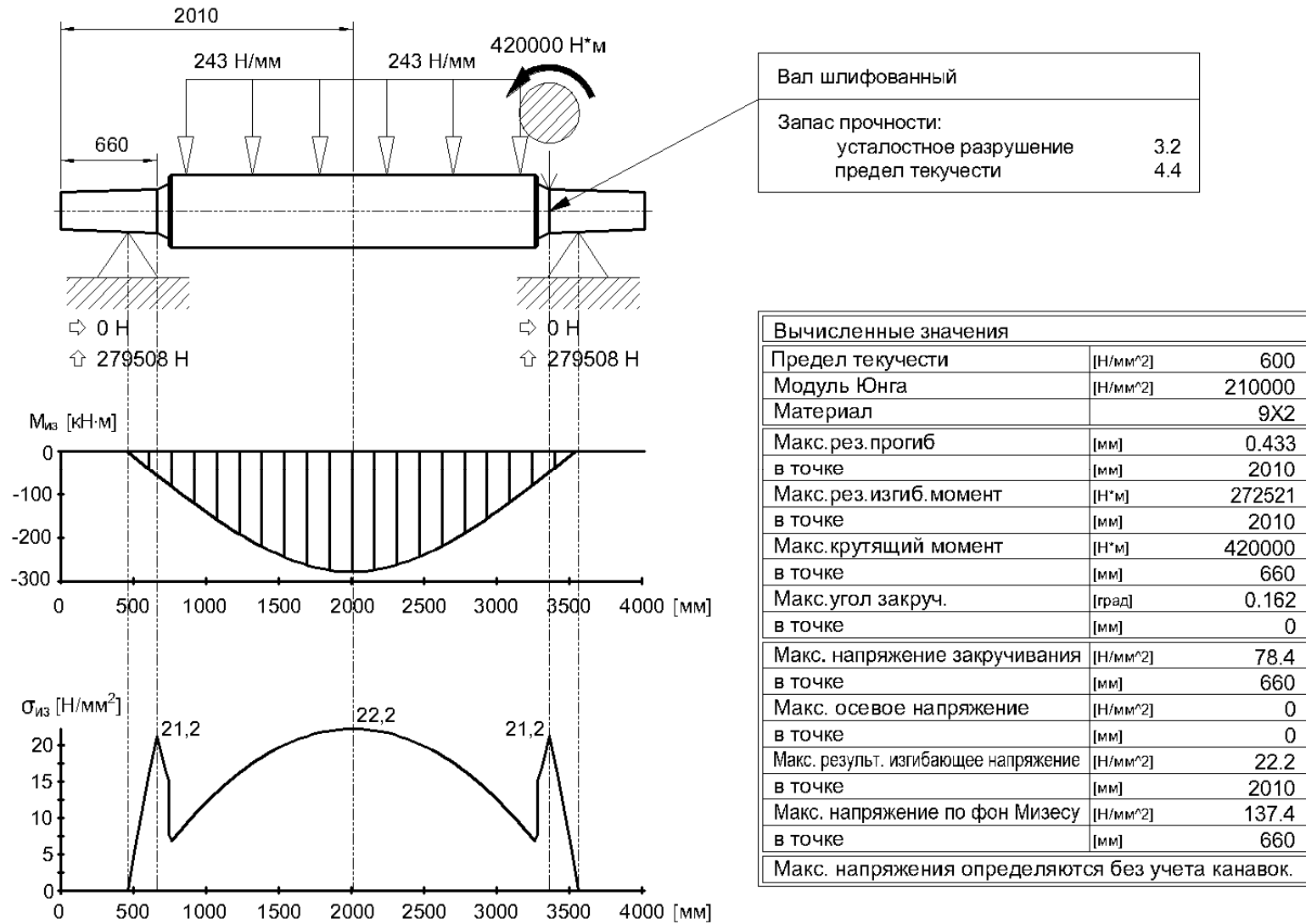


Рисунок 4.6 – Результаты розрахунків робочого валка на деформацію і міцність

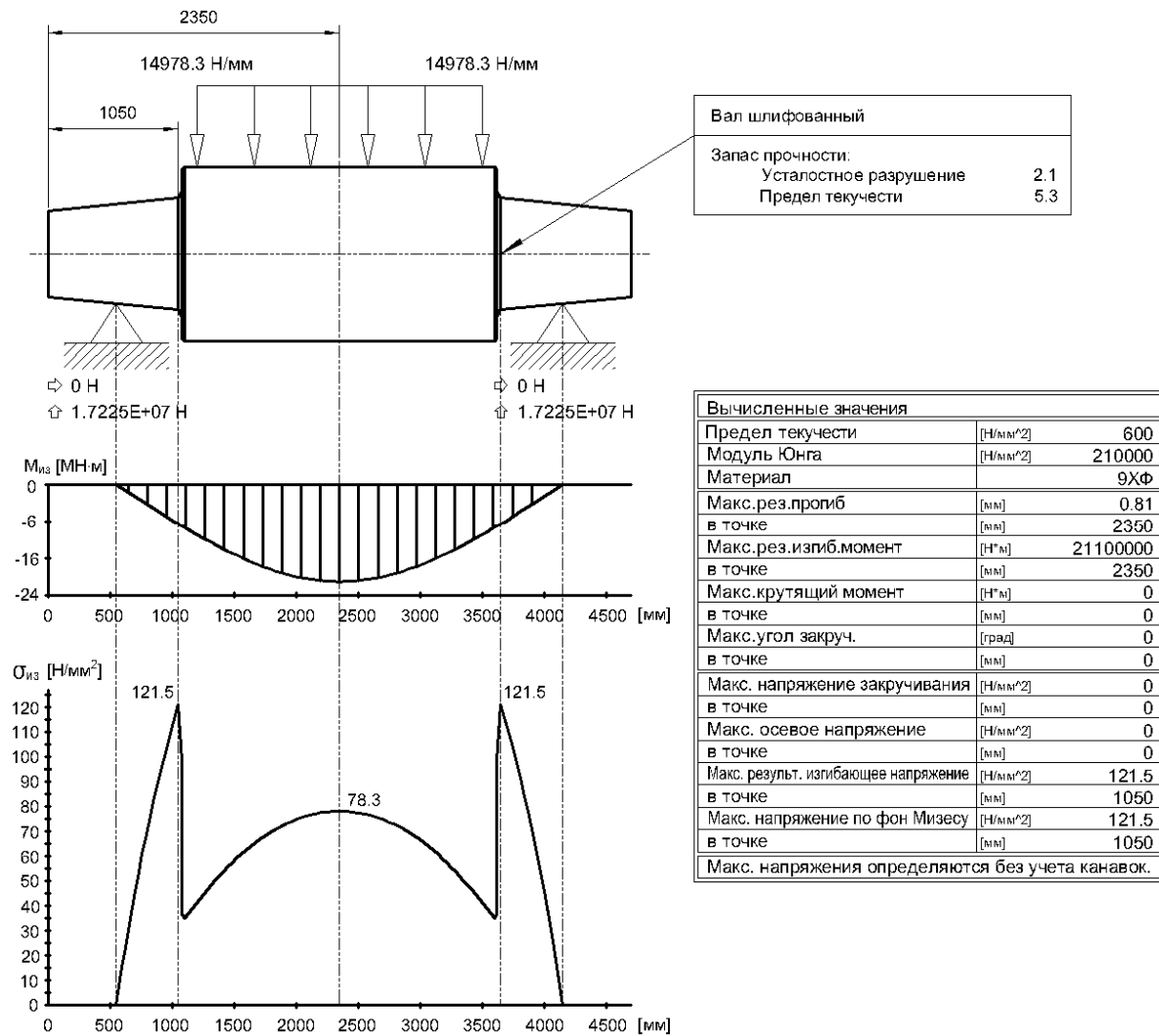
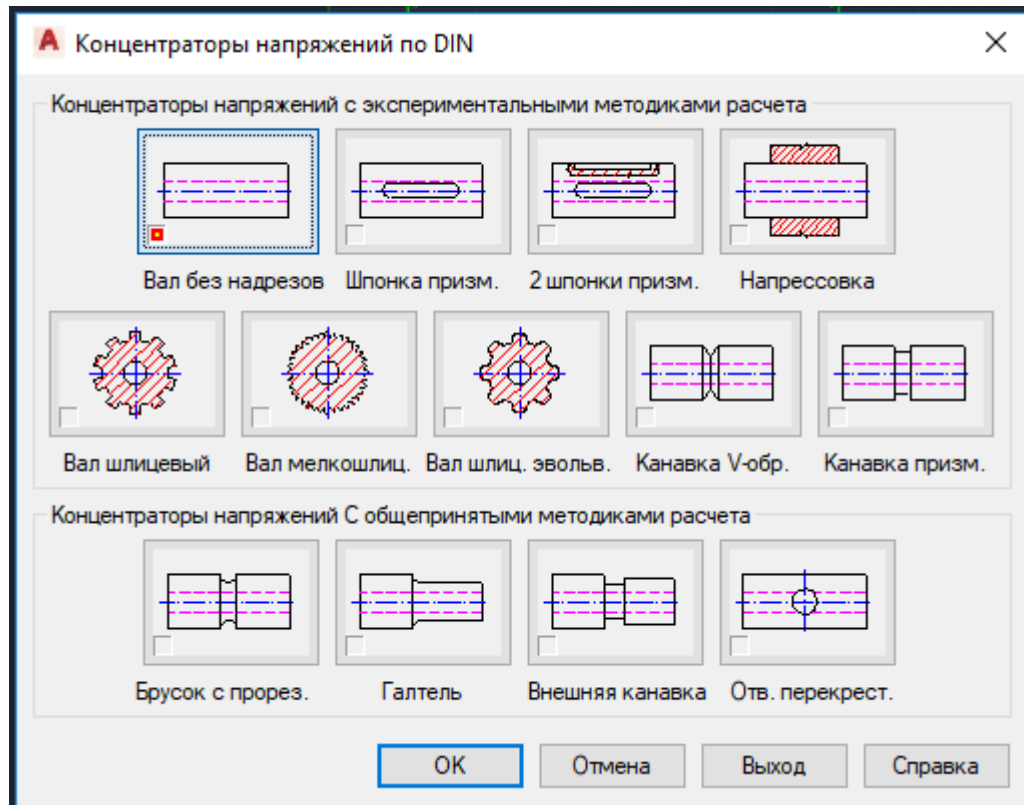


Рисунок 4.7 – Результаты розрахунку опорного вала на деформацію і міцність

Програма AutoCAD Mechanical 2021 має можливість враховувати при розрахунках міцності велику кількість різноманітних коефіцієнтів, концентраторів напружень, меж плинності, міцності і втоми при симетричних і несиметричних циклах згинання і кручення, стану поверхні матеріалу тощо (рис. 4.8), що дозволяє виконувати розрахунки на міцність досить швидко і з великою точністю.



**Рисунок 4.8** – Вибір концентраторів напружень в AutoCAD Mechanical 2021 при згинанні і крученні валка

Крім того, AutoCAD Mechanical 2021 виконує розрахунок на витривалість (циклічну міцність або втоми) у будь-якому перетині валка. Для опорного і робочого валків коефіцієнт запасу втоми міцності в шийці валка по галтелі (у місці з'єднання бочки і шийки валка) відповідно дорівнює 3,2 і 2,1 (рис. 4.6 і 4.7). Мінімальне допустиме значення цього коефіцієнту 1,3 – 2,5 [6].

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

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

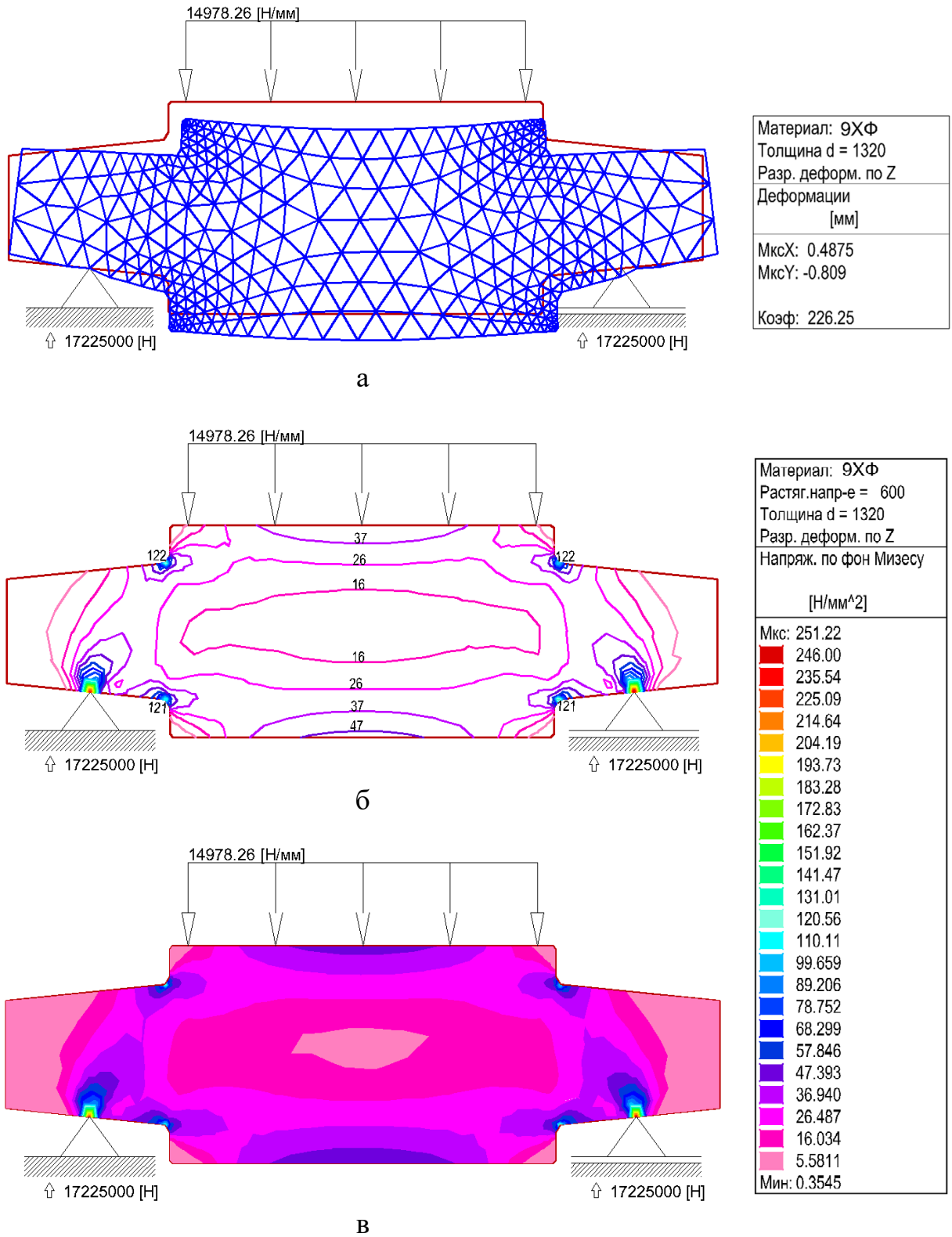
Прогинання валків впливає на нерівномірність товщини прокатування штаби по ширині і на жорсткість прокатної клітини. Прогинання опорного валка, визначене AutoCAD Mechanical 2021 (рис. 4.7 і 4.9) складає по середині бочки 0,81 мм, обчислене в літературі – 0,86 мм [5], що достатньо близько.

AutoCAD Mechanical 2021 дозволяє виконувати також оцінку напружено-деформованого стану металу методом скінченних елементів (МСЕ) [19]. Ці результати можуть бути використані для удосконалення конструкції прокатного валка. Мета методу – дати уявлення про розподіл деформацій і напружень. На рис. 4.9 (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 бочки і шийки валка. Умовно опори валка показані точковими, тому і напруження в них має максимальне значення. На практиці валки встановлені на підшипниках і навантаження розподіляється за всією шириною підшипникового вузла, що можна врахувати при виконанні розрахунків в AutoCAD Mechanical 2021.

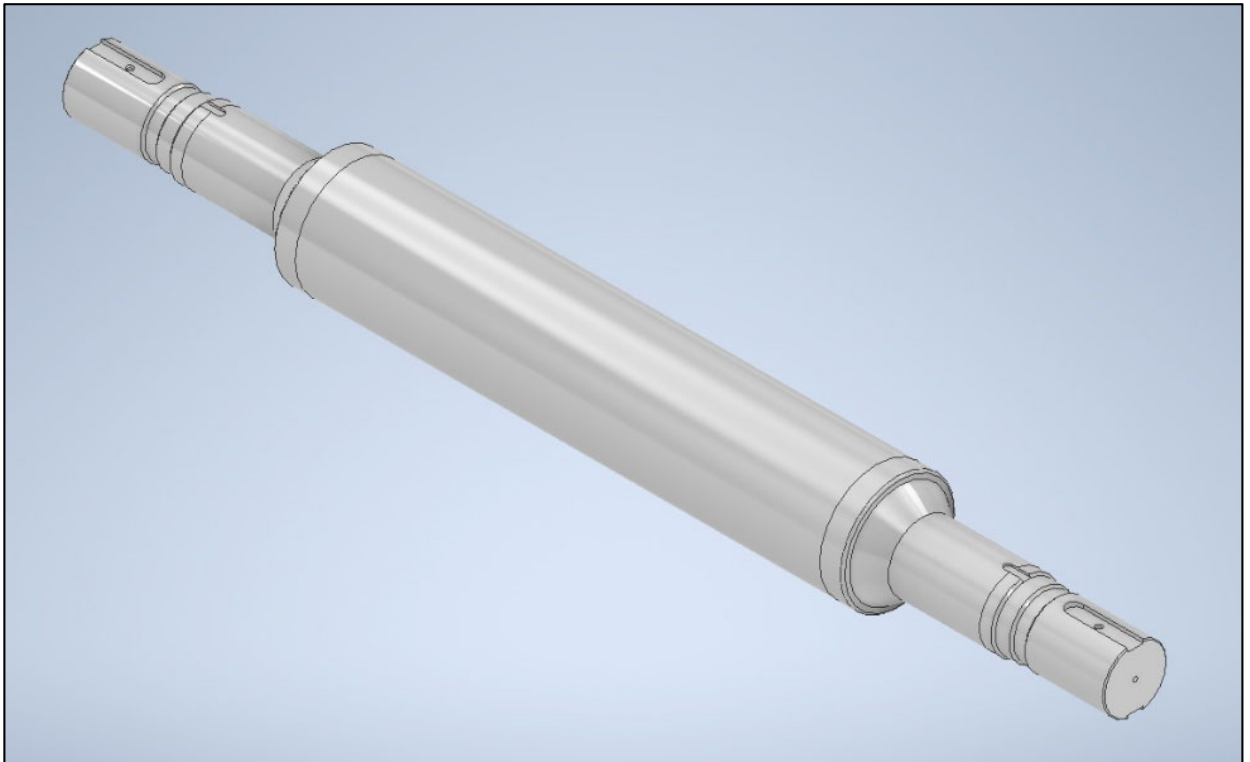
Також було застосовано сучасну систему тривимірного моделювання для конструювання робочого валка стану кварто відповідно до схеми, зображеній на рис. 4.1. Тривимірне моделювання дозволяє проектувати і бачити деталь в об'ємі, скоротити необхідність у кошових фізичних прототипах, прогнозуючи характеристики виробу за допомогою цифрових прототипів ще до виготовлення деталі на виробництві.

За допомогою розрахунків лінійних і нелінійних напружень можна досліджувати напруження, деформації, зміщення (прогинання валка), поперечні і поздовжні навантаження, що виникають внаслідок прикладення статичних зусиль. Це дозволяє прогнозувати залишкові і великі деформації, а також залишкові напруження.

Модель аналізу напруження виконувалася на основі 3D ескізу робочого валка, зображеного на рис. 4.10.



**Рисунок 4.9** – Розрахунок методом скінченних елементів опорного валка на деформацію (а); ізолінії (б) і ізообласті (в) напружень у валку



**Рисунок 4.10** – Модель робочого валка відповідно до рисунку 4.1

На ширину штаби 2300 мм діє сила 550 кН, реакція в опорних підшипниках, які розташовані на відстані 3100 мм, становить 275 кН [5].

На рис. 4.11 наведено напруження, що виникають у робочому валку при прокатуванні. Як видно з рис. 4.11, максимальні напруження виникають у шийках валка (24,56 МПа) і у центральній перетині валка (51,52 МПа), що приблизно збігається з напруженнями, отриманим у вищенаведених розрахунках (рис. 4.6), а також в літературі [5].

На рис. 4.12 наведено прогинання робочого валка при прокатуванні, яке становить 0,61 мм, що приблизно збігається з літературними даними [5]. Для компенсації впливу прогинання на товщину штаби, що викликає різновтовщинність, один з робочих валків необхідно зробити випуклим (шліфувати з випуклістю 0,3 – 0,5 мм), інший валок рівний [5].

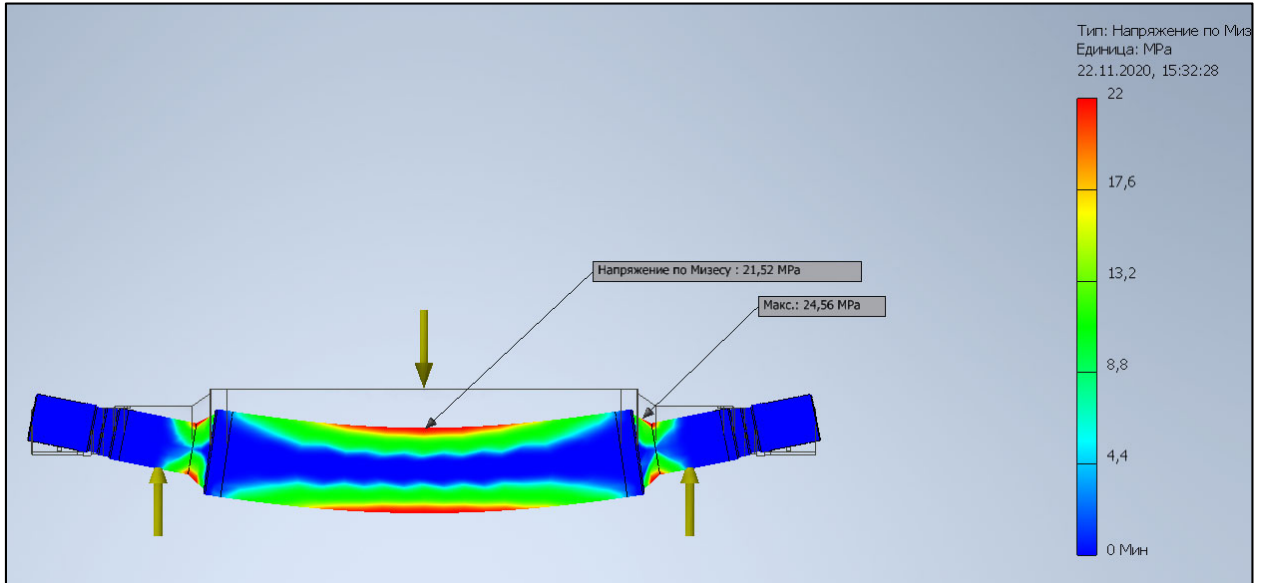
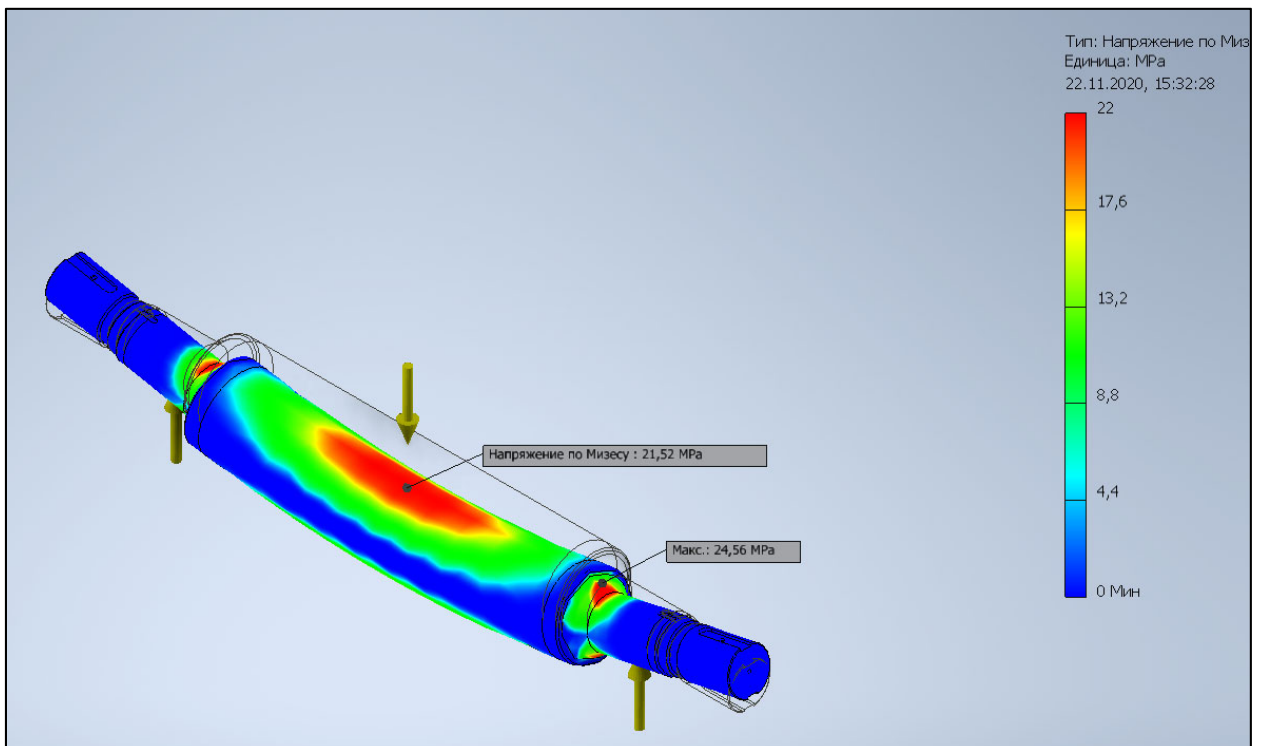
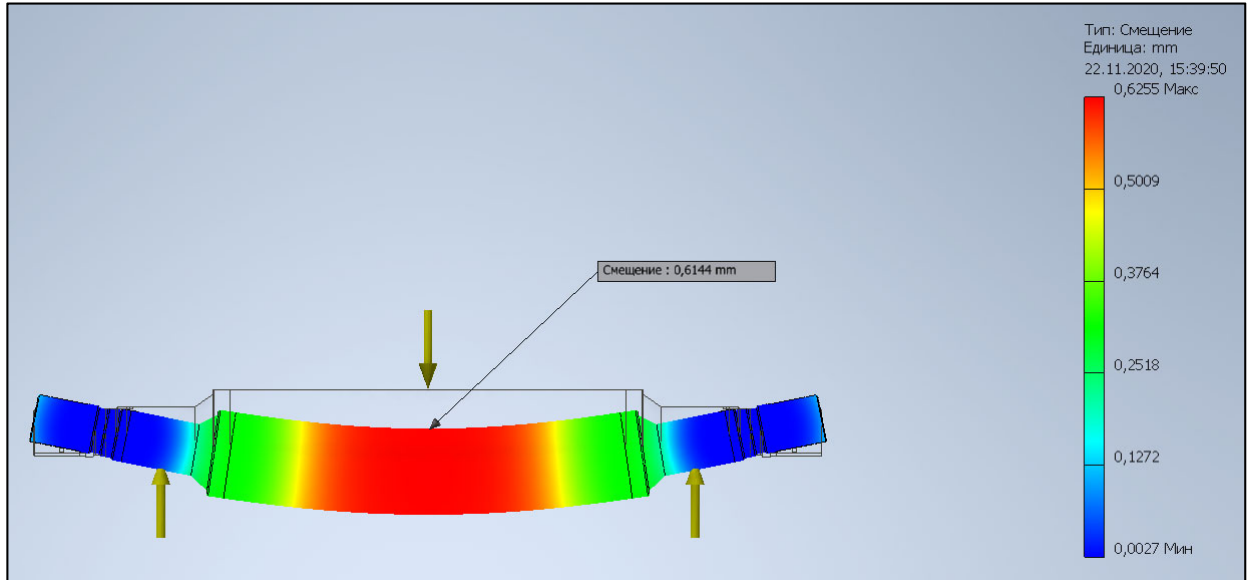


Рисунок 4.11 – Напруження у робочому валку при прокатуванні



Продовження рис. 4.11





**Рисунок 4.12** – Зміщення (прогинання) робочого валка при прокатуванні

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 5.1 Аналіз шкідливих і потенційних небезпечних факторів виробничого середовища

ЦХП - 1 відноситься до Пб категорії за ГОСТ 12.1.005-88, оскільки витрати енергії робітника становлять приблизно 178 ккал/годину.

Слід зазначити, що умови роботи вальцювальника на неперервному стані холодного прокатування «1680» ускладнюються тим, що їхня робоча зона розташована в безпосередній близькості до стану і незахищена закритою кабіною. Через постійне застосування мастил, що розширюються в асортиментів і необхідні для забезпечення високошвидкісного процесу прокатки, у повітрі робочої зони можливе надходження низько- і високомолекулярних жирних кислот, хлору, окису вуглецю, аерозолі мастила. Це вимагає обладнання неперервного стану холодного прокатування «1680» місцевою вентиляцією і витяжкою. Технічні засоби безпеки на стані холодного прокатування повинні забезпечувати захист працівників від підвищеного рівня шуму (пульти керування, екрани, шумозахисні кабіни), а також виключати можливість:

- ведення процесу при несправності кінцевих вимикачів, огорожень робітників, пристроїв заземлення;
- вимикання стану при перебуванні працюючих у небезпечній зоні поблизу стану.

Для запобігання травмування повинні бути виключені всі роботи з ручним завданням або іншими операціями на стані. Спостерігаються випадки травмування частинами валків, які відлітають, і ін. частками. Через неякісний метал і порушення технології підготовки валків можливо їхнє руйнування, що може стати причиною травмування працівників.

На неперервному стані холодного прокатування 1680 такі шкідливі фактори, як вібрація і теплове випромінювання відсутні.

На неперервному стані холодного прокатування 1680 використовується неперервний процес прокочування, тобто метал перебуває відразу у всіх клітинах, які зменшують час процесу прокатування й кількість допоміжних операцій. Це зменшує можливі випадки травматизму.

Вальцювальники і їх підручні повинні дотримувати ряду правил техніки безпеки при виконанні робіт [21].

Насамперед, це стосується робіт, пов'язаних з перебуванням працівників біля робочої клітини стану: зачищення, перевалки валків, чищення емульсійного колектору. Варто змити у клітині залишки мастила або емульсії, покласти вниз дошку, і після цього приступитися до роботи. Перед пуском стану вальцювальник повинен переконатися у відсутності людей у небезпечній зоні біля стану, справності кнопки аварійної зупинки. Біля стану не повинно бути деталей стану, обривів тощо. Проходи повинні бути вільні, підлога сухою і чистою, перекритою металевими гофрованими плитами. Необхідно перевірити справність захисних корпусів, які заземлюють електродвигуни і апаратуру, а також огороження прийомного стола, стелажів, кріплень що рухаються й обертаються.

Пари мастильно-охолоджуючої рідини, можуть викликати роздратування слизуватої оболонки верхніх дихальних шляхів.

Травмонебезпечні операції по стропуванню і перевезенню валків на візку; остання повинна завантажуватися не вище ботів. При стропуванні і знятті валків працюючі повинні стояти збоку візка.

На ділянці неперервного стану холодного прокатування 1680, внаслідок роботи устаткування, виникає підвищений шум 90.-92 дБА при нормі 85 дБА ГОСТ 12.1.003-83.

Оцінка факторів трудового процесу і виробничого середовища наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Оцінка факторів трудового і виробничого процесу

Робоче місце – вальцювальник

№ п/п	Фактори виробничого середовища й трудового процесу	Норм. знач. (ГДК, ГДУ)	Фактичне значення	III клас: шкідливі й небезпечні умови й характер праці			Час дії фактору за зміну, %
				I	II	III	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup> <u>I клас небезпеки</u>						
	Ангідрид хромовий	0,01	0,06			6,0	90
	Оксид марганцю	0,05	0,39			7,8	90
	<u>II клас небезпеки</u>						90
	Акролеїн	0,2	0,66		3,3		
	<u>III клас небезпеки</u>						90
	Ангідрид сірчистий	10	16,83	1,63			90
	Вуглецю оксид	20	25	1,25			90
	Масла мінеральні	5	6,78	1,36			
2	Пил переважно фиброгенної дії мг/м <sup>3</sup>	4,0	4,8	1,2			95
3	Вібрація (загальна й локальна) дБ.						
4	Шум, дБА	85	92		7		90
5	Інфразвук дБ						
6	Ультразвук дБ						
7	Іонізуюче випромінювання: - радіочастотний діапазон, В/м; - діапазон промислової частоти, кв/м; - оптичний діапазон (лазерне випромінювання), Вт/м <sup>2</sup>						
8	Мікроклімат у приміщенні:						
	- температура повітря <sup>0</sup> С;	16-27	32,1		5,1		100
	- швидкість руху повітря, м/с;	0,2-0,5	0,5				
	- відносна вологість повітря, %;	70-60	40				
9	- інфрачервоне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>						
	Температура навколишнього повітря(під час роботи на відкритому повітрі), <sup>0</sup> С:						
	- улітку - узимку						
10	Атмосферний тиск						
11	Вага й напруженість праці.						

## ВИСНОВКИ

**1. У загальній частині** роботи наведена технологія виробництва холоднокатаних штаб в цеху холодного прокатування ЦХП-1 комбінату «Запоріжсталь». Розглянуто основні технічні характеристики устаткування цеху. Наведено аналіз параметрів режиму деформації на НСХП 1680, вибір обтиснення в першій і останній клітях стану, вибір натягнення штаби і температурних умов прокатування . Виконано аналіз вузьких місць та запропоновано заходи щодо реконструкції стану, зокрема використання насічних валків.

Встановлено, що валки з рельєфом поверхні з подовжніми западинами (рельєф 3 і 4 на рис. 1.8) мають оптимальний рельєф, який забезпечує максимальну витяжку штаби при однаковій шорсткості поверхні валків і дозволяє підвищити стійкість штаби проти зсуву на край бочки.

За літературними джерелами встановлено, що розроблена фірмою SMS-DEAG технологія SVC (неперервна зміна профіля штаби) забезпечує найкращу якість штаби щодо площинності. Дана технологія закладена у проекті реконструкції прокатного виробництва комбінату «Запоріжсталь».

**2. У дослідницько - розрахунковій частині** виконано дослідження і розрахунок енергосилових параметрів при холодному прокатуванні тонких штаб. Розроблено програму, блок-схему і виконано розрахунок контактних напружень в осередку деформації у програмному комплексі Mathcad Prime 8. Досліджено вплив коефіцієнту тертя, натягнення штаби і діаметра валків на величину і характер розподілу контактних напружень в осередку деформації. Отримано графічні залежності, які показали відповідність з літературними даними.

Виконано розрахунки залежності довжини дуги захвату і кута захвату від діаметра валків і величини обтиснення. Побудовано графіки (у т.ч. контурні 3D), які підтвердили, що зі збільшенням діаметра валків і обтиснення кут захвату і довжина дуги захвату збільшуються.

Розрахунки швидкості виходу штаби з валків і випередження показали, що швидкість підвищується з підвищенням переднього натягнення штаби.

**3. У технологічній частині** наведено математичний опис процесу прокатування, в якому головну роль відіграє правильне уявлення взаємозв'язку характеристик поперечного профілю штаби та епюри залишкових поздовжніх напруг, а також характеристик епюри та фактичної неплоскості. Показано, що поперечний профіль і епюра поздовжніх напруг в деформованій штабі формуються в нерозривному взаємозв'язку один від одного в результаті взаємодії з осередком деформації, а характеристики фактичної неплоскості формуються остаточно тільки після зняття зовнішнього навантаження (натягу) на достатньому віддаленні від осередка пластичної деформації під дією утвореного в штабі поля залишкових поздовжніх напруг.

Наведена схема напружено-деформованого стану довільного поздовжнього перерізу штаби в  $j$ -й клітині багатоклітинного прокатного стану.

Результати роботи підтвердили наявність зв'язку між механічними властивостями та залишковими поздовжніми і поперечними напруженнями, що дає змогу за рівнем і характером розподілу залишкових поздовжніх і поперечних напружень у штабі визначити рівень і характер розподілу механічних властивостей у тонколистовому прокаті.

**4. У механічній частині** виконано розрахунок валків клітині кварто на деформацію і міцність з використанням програмного комплексу AutoCAD Mechanical 2021. Застосування генераторів компонентів і розрахункових модулів AutoCAD Mechanical 2021 дозволяє автоматизувати багато стандартних проектних завдань, виконувати розрахунки відповідно до міжнародних стандартів DIN або ANSI і значно скоротити час виконання розрахунків на деформацію і міцність валків прокатних станів. Порівняння даних, отриманих в AutoCAD Mechanical 2021 показує їх відповідність з літературними даними, отриманими розрахунковим шляхом. Реалізація алгоритма МСЕ дозволяє наочно представити результати розрахунків,

враховувати в розрахунках різні властивості матеріалів і різноманітні граничні умови для областей зі складною конфігурацією. Показано що програмний комплекс AutoCAD Mechanical 2021 може бути використаний при розрахунку валків робочих клітей прокатних станів, а також при аналізі деформацій, напружень, зміщення (прогинання валків), поперечних і поздовжніх навантажень, що виникають внаслідок прикладення статичних зусиль при прокатуванні листів та штаб (тривимірне моделювання).

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

**6.** Матеріали магістерської роботи опубліковано у збірнику наукових праць II Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України», 18 – 20 жовтня 2022 року. Запоріжжя : ЗНУ, 2022. С. 235 - 236.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. **Николаев В. А.** Напряжения, деформации и служба валков в клети кварто : монография. Запорожье : ЗГИА, 2018. 190 с.
2. **Василев Я. Д., Мінаєв О. А.** Теорія поздовжньої прокатування : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
3. **Николаев В. А.** Холодная прокатування полос : Ч.2. Учебн. пособ. Запорожье : ЗГИА, 2014. 241 с.
4. **PanjkoVIC V.** Friction and the Hot Rolling of Steel. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014. 234 p.
5. **Королев А. А.** Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов : учебн. пособ. Москва : Metallurgiya, 1985. 376 с.
6. **Целиков А. И.** Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката : учебник для ВУЗов. Москва : Metallurgiya, 1988. 680 с.
7. **Коновалов Ю. В.** Справочник прокатчика. Справочное издание в 3-х книгах. Книга 2. Производство холоднокатаных листов и полос : справочник. Москва : «Теплотехник», 2008. 608 с.
8. **Железнов Ю. Д.** Системные основы интенсификации производства широкополосной стали : монография. Москва : Metallurgiya, 1986. 152 с.
9. **Николаев В. А.** Процессы обработки металлов давлением : монография. Запорожье : Акцент Инвест – трейд, 2014. 192 с.
10. **Скляр В. О.** Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии : уч. пособие. Донецк : ДонНТУ, 2014. 224 с.
11. **Делюсто Л. Г.** Основы прокатування металлов в постоянных магнитных полях : монография. Москва : Машиностроение, 2005. 272 с.
12. **Божков А.И.** Плоскостность тонколистового проката : монография. Москва : ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 1998. 264 с.



13. **Очков В. Ф.** Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов : монография. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2007. 368 с.
14. **Шестаков Н. А.** Расчеты процессов обработки металлов давлением в Mathcad (решение задач энергетическим методом) : монография. Москва : МГИУ, 2008. 333 с.
15. **Проскурович О. В.,** Бойчук В.А. Комп'ютерні технології економічного аналізу : навч. посіб. Львів : Новий Світ, 2012. 310 с.
16. **Цепин М. А.** Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением / М.А. Цепин, В.В. Бегнарский, Н.Л. Лисунец, М.В. Сеницын, М.А. Ерохов // Цветные металлы. – 2007. - № 5. – С. 98 – 101.
17. **Большаков В. П.,** Бочков А. Л. Основы 3D-моделирования. Изучаем работу в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor : монография. Санкт-Петербург : Питер, 2013. 304 с.
18. **Грицына Н. И.** Проектирование деталей машин с использованием генераторов компонентов и расчетных модулей Autodesk Inventor / Н.И. Грицына // Вестник ХНАДУ. – 2015. – Вып. 69. – С. 13 – 18.
19. **Боровік П. В.** Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навч. посіб. Алчевськ : ДонДТУ, 2012. 170 с.
20. **Федорченков А. П.,** Кимаев А. М. AutoCAD Mechanical : практическое руководство. Москва : «ТехБук», 2004. 688 с.
21. **Жидецкий В. Ц.,** Джигирей В. С., Мельников А. В. Основы охраны труда : учебн. пособ. Львов : Афиша, 2000. 351 с.

## **ДОДАТОК А**

**Публікація за темою кваліфікаційної магістерської роботи**

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
Запорізька міська рада  
Запорізька обласна державна адміністрація  
Національний університет «Львівська політехніка»  
Національний університет «Києво-Могилянська Академія»  
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
Національний транспортний університет

## **МАТЕРІАЛИ**

II ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА  
УЧАСТЮ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ  
**«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТА  
СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»**

**18-20 жовтня 2022 року**

Запоріжжя

2022

2

навантаження коливальної системи. При складанні розрахункової схеми варто систему представити у вигляді окремих обертових мас: ротор електродвигуна і моторна муфта – перша маса; вали редуктора, муфта корінна – друга маса; верхній шестерінчастий валок, верхній шпindel і верхній робочий валок – третя маса; нижній шестерінчастий валок, нижній шпindel і нижній робочий валок – четверта маса.

#### Список використаних джерел

1. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680 : монографія / В.В. Веренев та ін. Днепропетровск : ИМА–пресс, 2011. 184 с.
2. Веренев В.В. Снижение динамических нагрузок и диагностика широкополосных станов в переходных режимах. Никополь : СПД Фельдман О.О., 214. 203 с.
3. Динамика и прочность прокатного оборудования / Ф.К. Иванченко та ін. Москва : Металлургия, 1970. 486 с.

УДК 621.771 (076)

Федорченко О.В., магістрант 2 курсу  
Науковий керівник – к.т.н., доцент Проценко В.М.

#### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЛОЩИННОСТІ І МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХОЛОДНОКАТАНОГО ТОНКОШТАБОВОГО ПРОКАТУ**

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького  
національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та  
техногенної безпеки*

Метою роботи є математичний опис процесу прокатки, в якому головну роль відіграє правильне уявлення взаємозв'язку характеристик поперечного профілю штаби та епюри залишкових поздовжніх напруг, а також характеристик епюри та фактичної неплщинності.

Поперековий профіль і епюра поздовжніх напруг (при існуванні натягу – епюри питомих натягів) в деформованій штабі формуються в нерозривному взаємозв'язку один від одного в результаті взаємодії з осередком деформації, а характеристики фактичної неплщинності формуються остаточно тільки після зняття зовнішнього навантаження (натягу) на достатньому віддаленні від осередка пластичної деформації під дією утвореного в штабі поля залишкових поздовжніх напруг.

Механізм цієї взаємодії є актуальною задачею, яку розглянуто на прикладі деформації штаби у довільній клітці  $j$  багатоклітинного прокатного стана.

Для стана холодної прокатки зроблено такі припущення: деформація в осередку деформації плоска, поза осередком деформації – пружна; в штабі присутні тільки «приховані» класи неплщинності [1].

За аналогією з іншими роботами представимо штабу у вигляді сукупності окремих поздовжніх перерізів, пружно пов'язаних між собою і підлеглих поза осередком деформації закону Гука. Правомочність подібного підходу підтверджена результатами багатьох робіт.

Наведена схема напружено-деформованого стана довільного поздовжнього перерізу штаби в  $j$ -й кліті багатоклітинного прокатного стана.

Зі схеми отримано співвідношення між зазначеними довжинами і товщинами (зроблено припущення, що пружна деформація вздовж осі відсутня – поздовжні перерізи пружно взаємопов'язані).

#### **Список використаних джерел**

1. A.V. Yavtushenko, V.M. Protsenko, Yu.A. Belokon and Yu.V. Bondarenko. Productivity Optimization of Cold Rolling Mills. *Steel in Translation*, 2020, Vol. 50, No. 5, pp. 335–339.

УДК 621.771.01

Чебанов О.Л., магістрант 2 курсу  
Науковий керівник – д.т.н, професор Белоконь Ю.О.

### **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРОКАТКИ ВАЛКОВИХ ВУЗЛІВ БАГАТОВАЛКОВИХ СТАНІВ**

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Робота присвячена вивченню впливу точності прокатки валкових вузлів багатовалкових станів.

Основну роль в забезпеченні точності прокатки на багатовалкових станах грає валковий вузол і його характеристики: жорсткість, точність виготовлення, геометричні параметри валків. Вказані характеристики були розглянуті і проаналізовані в найбільш характерних літературних джерелах.

При дослідженні багатовалкових станів велика увага приділялася вибору робочого валка, що визначає максимальну величину обтиску і мінімальну товщину прокатних стрічок, а також діаметрів приводних валків і опорних роликів, що забезпечують передачу необхідного моменту, що крутить, і максимальне зусилля площення відповідно.

Метою роботи був аналіз методів визначення мінімальної товщини листів і розробки номограм оптимізації діаметрів валків на багатовалкових станах холодного площення.

Для вибору діаметру робочого валка багатовалкового стану, що забезпечує раціональний режим площення в роботі використовувалися методики Стоуна, Тонга, Робертса, Корольова і ін. для визначення мінімальної товщини штаби.