


**МОДЕЛЮВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
з дисципліни

«Моделювання та комп'ютерні технології в прокатному
виробництві»

(для студентів спеціальності 136 Металургія усіх форм
навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти)

*Рекомендовано Науково-методичною
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 1 від «22 » вересня 2022 р.)
Обов'язково до розміщення в репозитарії*



Моделювання та комп'ютерні технології в прокатному виробництві (для студентів спеціальності 136 Металургія усіх форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти) / Уклад. Н.С. Грудкіна, Е.П. Грибков, Х.В. Малій. Запоріжжя: ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2022. 76 с.


Розглянуто математичні моделі, параметри і критерії оптимізації, а також алгоритми з моделювання та автоматизованого проектування технологічних процесів та обладнання з прокатного виробництва. Докладно описані приклади й показаний хід виконання лабораторних робіт. Наведено завдання для самостійної роботи студентів. Кожна лабораторна і самостійна роботи містять контрольні питання для самоперевірки знань студентів

Рекомендовано для студентів спеціальності 136 Металургія другого (магістерського) рівня освіти.

Самостійне електронне текстове мережеве видання

Затверджено на засіданні кафедри
базових галузей промисловості
Протокол № 2 від «6» вересня 2022 р.

Узгоджено:
Секретар Редакційної ради


Малій Х. В.
«9 » вересня 2022 р.

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2022



ЗМІСТ

ВСТУП	5
Лабораторна робота 1 Автоматизований розрахунок коефіцієнтів регресії, що характеризують інтенсивність деформованого зміцнення різних металів та сплавів при їх холодній деформації	7
Лабораторна робота 2 Математичне моделювання енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки	11
Лабораторна робота 3 Математичне моделювання енергосилових параметрів процесу холодної прокатки	16
Лабораторна робота 4 Математичне моделювання, розробка, наладка та чисельна реалізація програмних засобів з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесів гарячої та холодної прокатки відносно товстих листів та полос на основі методу верхньої оцінки	21
Лабораторна робота 5 Математичне моделювання та програмні засоби з автоматизованого розрахунку поточних по довжині осередку деформування геометричних, кінематичних та деформаційних показників процесу прокатки	25
Лабораторна робота 6 Математичне моделювання, розробка, налагодження та чисельна реалізація програмних продуктів з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу дресировки тонких лент та полос	31
Лабораторна робота 7 Автоматизоване проектування технологічних режимів обтиснення під час гарячої прокатки відносно широких листів і полос	34
Лабораторна робота 8 Автоматизоване проектування технологічних режимів обтиснення при холодній прокатці відносно тонких листів і полос	38
Лабораторна робота 9 Автоматизоване проектування технологічних режимів обтиснення при прокатці на реверсивних листових станах	40
Лабораторна робота 10 Автоматизоване проектування технологічних режимів обтиснення при сортовій прокатці	42



Лабораторна робота 11	
Автоматизоване проектування технологічних режимів обтиснення при прокатці блюмів	45
Лабораторна робота 12	
Автоматизоване проектування нарізних з'єднань	48
Лабораторна робота 13	
Автоматизоване проектування валів і осей приводів прокатних станів	50
Лабораторна робота 14	
Автоматизований розрахунок і проектування валкових вузлів типу «ДУО»	53
Лабораторна робота 15	
Автоматизований розрахунок і проектування валкових вузлів типу «КВАРТО»	56
Лабораторна робота 16	
Автоматизоване проектування натискних механізмів електромеханічного типу	59
Лабораторна робота 17	
Автоматизоване проектування гідравлічних натискних механізмів	62
Лабораторна робота 18	
Автоматизоване проектування вузла станин з умови рівномірності	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71
ДОДАТОК А	72
ДОДАТОК Б	74
ДОДАТОК В	75
ДОДАТОК Г	76



ВСТУП

Лабораторний практикум дисципліни «Моделювання та комп'ютерні технології в прокатному виробництві» спрямований на закріплення теоретичних знань та набуття практичних навичок щодо оптимізації технологічних режимів різних процесів обробки металів тиском. Обов'язковим для виконання лабораторних робіт є наявність базових знань з програмування.

Під час виконання лабораторних робіт студенти самостійно розробляють і здійснюють налагодження програмних засобів, аналізують отримані чисельні результати, роблять висновки і формулюють практичні рекомендації з вибору оптимальних технологічних режимів і конструктивних параметрів обладнання для реалізації різних металургійних процесів.

Правила виконання лабораторних робіт

1. Лабораторні роботи виконуються згідно із затвердженим семестровим графіком, який виклаються в Moodle.
2. До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які завчасно ознайомилися з її змістом і методикою виконання і які вивчили відповідні розділи теоретичного курсу.
3. Перед початком лабораторних робіт розподіляються обов'язки між студентами, які працюють на одній персональній ЕОМ.
4. Роботи виконуються в послідовності, описаної в методичних вказівках. Прикінцевими етапами кожної роботи є обробка і аналіз результатів чисельної реалізації, формулювання висновків і рекомендацій.
5. У разі завершення роботи на обчислювальній техніці до закінчення занять студенти приступають до оформлення звіту.
6. Звіт про виконання лабораторної роботи в обов'язковому порядку подається викладачеві в кінці даної або перед початком наступної лабораторної роботи. За наявності правильно оформленого звіту дозволяється захист лабораторної роботи, в іншому випадку студент до подальших занять не допускається.
7. При захисті лабораторної роботи студент зобов'язаний знати основні теоретичні положення за даною роботою, вміти сформулювати висновки з отриманих чисельних результатів.
8. До виконання лабораторної роботи допускаються особи, які пройшли інструктаж з техніки безпеки.

Правила техніки безпеки

1. Забороняється включати або вимикати обчислювальну техніку без дозволу керівника занять.
2. При роботі на персональних комп'ютерах дозволяється перебувати тільки з боку обслуговування; йти зі свого робочого місця і переходити на інше без дозволу викладача забороняється.
3. Забороняється заходити до лабораторії у верхньому одязі, при



цьому особисті речі необхідно залишити в спеціально відведеному для цього місці.

4. Забороняється залишати включений комп'ютер без нагляду, відкривати задні панелі і захисні кришки, чіпати і перемикати з'єднувальні дроти.

5. Не можна спиратися на обчислювальну техніку, класти на неї будь-які предмети і чіпати без потреби руками.

Загальні вказівки щодо оформлення звіту

Звіт повинен містити найменування та мету даної лабораторної роботи, стислий виклад методичного та інформаційного забезпечення, збільшену блок-схему алгоритму і запис програмних засобів, табличну та графічну інтерпретації результатів чисельної реалізації, їх аналізування, висновки і практичні рекомендації.



Лабораторна робота 1

Автоматизований розрахунок коефіцієнтів регресії, що характеризують інтенсивність деформованого зміцнення різних металів та сплавів при їх холодній деформації

Завдання: Провести автоматизований розрахунок коефіцієнтів регресії для матеріалів із порядковим номером N , рівним порядковому номеру студента у журналі викладача (рис. 1.1). Розрахувати з урахуванням отриманих значень коефіцієнтів регресії a_0, a_1, a_2, a_3 величину межі текучості σ_T у діапазоні відносних обтиснень $\varepsilon=0,0\dots0,6$ та провести оцінку похибки аналітичного опису. Побудувати графік зміни межі текучості $\sigma_T(\varepsilon)$ для досліджуваного матеріалу. Провести аналіз одержаних результатів.

Короткі теоретичні відомості

Рішення задач щодо підвищення точності результатів математичного моделювання процесів холодної прокатки нерозривно пов'язане з необхідністю уточнення методів розрахунку механічних властивостей металу, що деформується, оскільки саме вони багато в чому визначають енергосилові умови реалізації і є одночасно одними з найважливіших критеріїв при оцінці якості готової металопродукції.

У загальному випадку такі показники механічних властивостей, як тимчасовий опір σ_B , умовний $\sigma_{0,2}$ та фізичний σ_T межі плинності, відносне подовження при розриві δ , показники твердості HB, HV та інші в умовах холодної деформації характеризуються цілою низкою параметрів. Такими параметрами є хімічний склад і структура металу, що деформується, схема напруженого стану, температурно-швидкісні умови, анізотропія, ступінь дробовості і немонотонність процесу пластичного формозмінення. У зв'язку з різноманіттям факторів, що визначають механічні властивості металів в умовах холодної деформації та недостатньою їх вивченістю, проведення узагальненого комплексного аналізу ускладнене, тому при розрахунку реальних технологічних процесів враховують лише основні показники, якими, зокрема, є показники ступеня деформації, розглянуті стосовно конкретного металу або сплаву.

Відомо, що в процесі пластичної деформації металів і сплавів відбувається їхнє деформаційне зміцнення, яке спостерігається внаслідок складності руху дислокації при їх взаємодії. Існуючі в цьому випадку гіпотези та моделі деформаційного зміцнення значною мірою засновані на теорії Тейлора, яка передбачає наявність дислокаційного механізму пластичної течії металу. Дислокації згідно з цією теорією, затримуючись у кристалах, поступово створюють внутрішні напруження, а дислокаційні стінки і скупчення, що при цьому утворюються, призводять до збільшення опору металу його пластичної деформації (рис. 1.1).

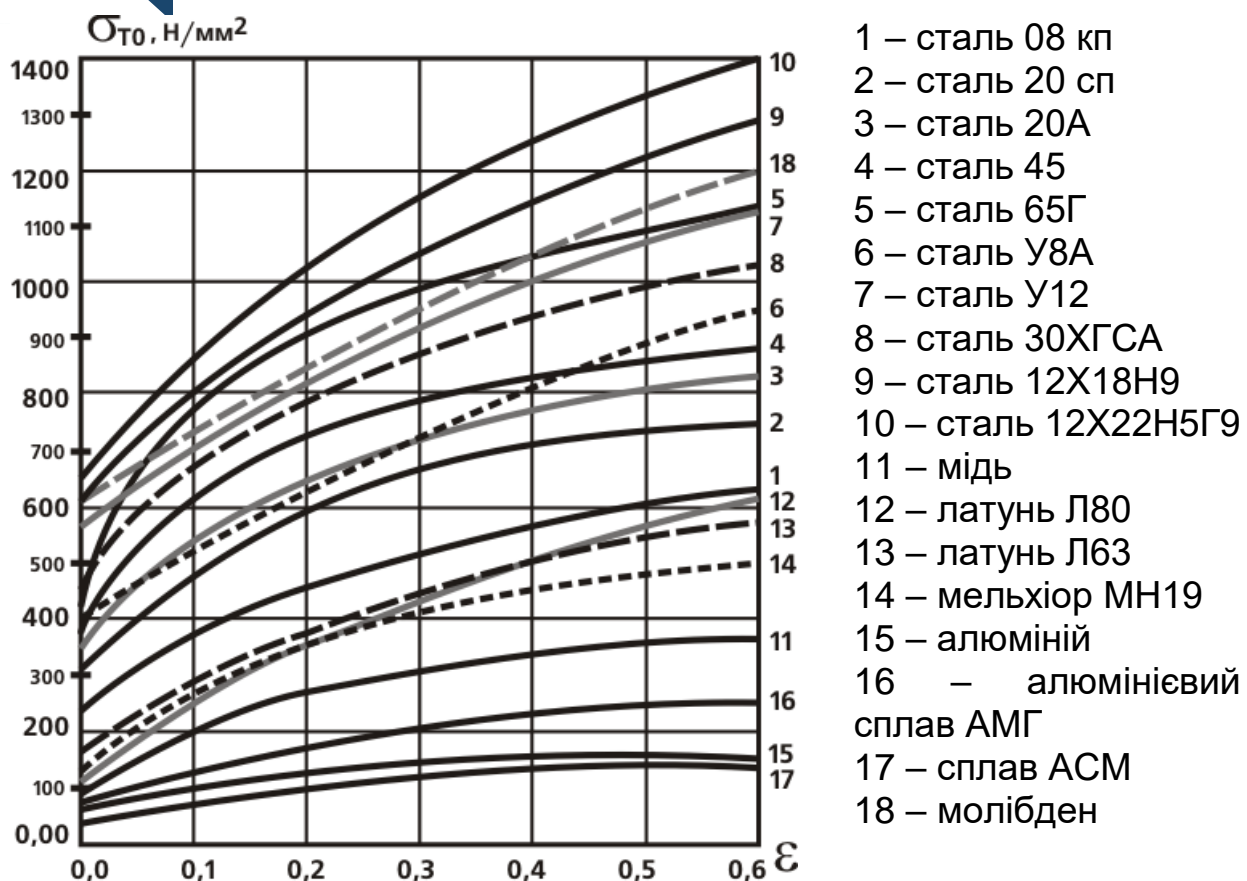


Рисунок 1.1 – Експериментальні розподіли межі текучості різних матеріалів залежно від показника ступеня їхньої холодної деформації

У той же час безпосереднє визначення механічних властивостей кожного окремого металу або сплаву здійснюють переважно на основі експериментальних методів дослідження, основними з яких є випробування на розтяг, осадку і кручення, а також твердість. Усі види зазначених вище випробувань проводяться за стандартними методиками, а їх результати у вигляді табличних і графічних інтерпретацій інтенсивності деформаційного зміцнення широко представлені у науково-технічній літературі. Крім того, у ряді робіт [1-3] дано й аналітичні описи залежностей $\sigma_{0,2}(\varepsilon)$, які можна подати у наступному вигляді:

$$\sigma_T(\varepsilon) = \sigma_{T0} + a\varepsilon^n, \quad (1.1)$$

де ε - показник відносного ступеня деформації, який визначається при холодній прокатці і в залежності від вихідної h_0 і кінцевої h_1 товщини полоси як $\varepsilon = (h_0 - h_1) / h_0$;

а, n - постійні для кожного окремого металу чи сплаву коефіцієнти, що характеризують його природні механічні властивості.



Слід зазначити, що використання степеневі залежності (1.1) дозволяє з достатньою точністю відобразити основні закономірності деформаційного зміцнення різних металів і сплавів [1,3]. Разом з тим наявність степеневого показника, що дорівнює $n=0.3...1.0$, ускладнює застосування виразів даного виду для розрахунку середньоінтегрального за довжиною осередка деформації та значення межі текучості σ_{TC} , кількісна оцінка якого необхідна для подальшого розрахунку енергосилових параметрів процесу. Рекомендоване в цьому випадку обчислення σ_{TC} як середньоарифметичного значення меж текучості до та після деформації [4], внаслідок нелінійного характеру розподілу $\sigma_{T(x)}$, і призводить до дещо занижених результатів. Визначення ж σ_{TC} за величиною середньоінтегрального значення ступеня деформації ϵ_c призводить до дещо завищених результатів. Похибки, що вносяться при цьому, можуть перевищувати 10% і є найбільш суттєвими у разі максимальної інтенсивності деформаційного зміцнення, що має місце при деформації відпалених лент і полос у першому проході, тобто у діапазоні відносних обтискань $\epsilon < 0,4$.

З урахуванням викладеного вище як аналітичні описи інтенсивності деформаційного зміцнення металів і сплавів при їх випробуваннях у стандартних умовах у цій роботі були прийняті поліноми третього ступеня, що мають наступний вигляд [5]:

$$\sigma_T(\epsilon) = a_0 + a_1\epsilon + a_2\epsilon^2 + a_3\epsilon^3, \quad (1.2)$$

де a_i - постійне для даного металу чи сплаву значення коефіцієнтів регресії, що характеризує його природні механічні властивості з погляду інтенсивності деформаційного зміцнення.

Перевагою залежності (1.2) є відносна простота статистичної обробки масиву емпіричних даних, а також висока точність самого аналітичного опису. Безпосередньо визначення коефіцієнта регресії a_i може бути здійснено за допомогою стандартних програм інтерполювання, або шляхом вирішення системи трьох лінійних рівнянь з трьома невідомими [6]. При цьому рішеннями даної системи з урахуванням наявності чотирьох відомих значень меж текучості (σ_{T0} при $\epsilon=0$; σ_{T1} при $\epsilon_1=0,2$; σ_{T2} при $\epsilon_2=0,4$; σ_{T3} при $\epsilon_3=0,6$) будуть вирази наступного виду:

$$a_0 = \sigma_{T0}; \quad a_1 = \frac{Da_1}{D}; \quad a_2 = \frac{Da_2}{D}; \quad a_3 = \frac{Da_3}{D}, \quad (1.3)$$

де $D, D_{a1}, D_{a2}, D_{a3}$ - визначники третього порядку, що записуються згідно з канонічною формою системи рівнянь як:

$$D = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_1^2 & \varepsilon_1^3 \\ \varepsilon_2 & \varepsilon_2^2 & \varepsilon_2^3 \\ \varepsilon_3 & \varepsilon_3^2 & \varepsilon_3^3 \end{vmatrix} = \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 \varepsilon_3^3 + \varepsilon_2 \varepsilon_3^2 \varepsilon_1^3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1^2 \varepsilon_2^3 - \varepsilon_3 \varepsilon_2^2 \varepsilon_1^3 - \varepsilon_1 \varepsilon_3^2 \varepsilon_2^3 - \varepsilon_2 \varepsilon_1^2 \varepsilon_3^3;$$

$$Da_1 = \begin{vmatrix} (\sigma_{T1} - \sigma_{T0}) & \varepsilon_1^2 & \varepsilon_1^3 \\ (\sigma_{T2} - \sigma_{T0}) & \varepsilon_2^2 & \varepsilon_2^3 \\ (\sigma_{T3} - \sigma_{T0}) & \varepsilon_3^2 & \varepsilon_3^3 \end{vmatrix} = (\sigma_{T1} - \sigma_{T0}) \varepsilon_2^2 \varepsilon_3^3 + (\sigma_{T2} - \sigma_{T0}) \varepsilon_3^2 \varepsilon_1^3 + (\sigma_{T3} - \sigma_{T0}) \varepsilon_1^2 \varepsilon_2^3 -$$

$$- (\sigma_{T3} - \sigma_{T0}) \varepsilon_2^2 \varepsilon_1^3 - (\sigma_{T1} - \sigma_{T0}) \varepsilon_3^2 \varepsilon_2^3 - (\sigma_{T2} - \sigma_{T0}) \varepsilon_1^2 \varepsilon_3^3;$$

$$Da_2 = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & (\sigma_{T1} - \sigma_{T0}) & \varepsilon_1^3 \\ \varepsilon_2 & (\sigma_{T2} - \sigma_{T0}) & \varepsilon_2^3 \\ \varepsilon_3 & (\sigma_{T3} - \sigma_{T0}) & \varepsilon_3^3 \end{vmatrix} = \varepsilon_1 (\sigma_{T2} - \sigma_{T0}) \varepsilon_3^3 + \varepsilon_2 (\sigma_{T3} - \sigma_{T0}) \varepsilon_1^3 + \varepsilon_3 (\sigma_{T1} - \sigma_{T0}) \varepsilon_2^3 -$$

$$- \varepsilon_3 (\sigma_{T2} - \sigma_{T0}) \varepsilon_1^3 - \varepsilon_1 (\sigma_{T3} - \sigma_{T0}) \varepsilon_2^3 - \varepsilon_2 (\sigma_{T1} - \sigma_{T0}) \varepsilon_3^3;$$

$$Da_3 = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_1^2 & (\sigma_{T1} - \sigma_{T0}) \\ \varepsilon_2 & \varepsilon_2^2 & (\sigma_{T2} - \sigma_{T0}) \\ \varepsilon_3 & \varepsilon_3^2 & (\sigma_{T3} - \sigma_{T0}) \end{vmatrix} = \varepsilon_1 \varepsilon_2^2 (\sigma_{T3} - \sigma_{T0}) + \varepsilon_2 \varepsilon_3^2 (\sigma_{T1} - \sigma_{T0}) + \varepsilon_3 \varepsilon_1^2 (\sigma_{T2} - \sigma_{T0}) -$$

$$- \varepsilon_3 \varepsilon_2^2 (\sigma_{T1} - \sigma_{T0}) - \varepsilon_1 \varepsilon_3^2 (\sigma_{T2} - \sigma_{T0}) - \varepsilon_2 \varepsilon_1^2 (\sigma_{T3} - \sigma_{T0}) \quad (1.4)$$

Іншою перевагою використання залежності виду (1.2) є можливість безпосереднього аналітичного визначення величини середньоінтегрального значення межі текучості σ_{Tc} , що враховує реальну, тобто опуклу форму, діючого інструменту прокатних станів. Зокрема, проінтегрувавши вираз (1.2) з урахуванням поточного значення товщини полоси $h_x = h_1 + 2 \cdot R \cdot (1 - \cos \alpha)$, що впливає з рівняння кола, отримаємо [5]:

$$\sigma_{Tc} = a_0 + a_1 \varepsilon_0 + a_2 \varepsilon_0^2 + a_3 \varepsilon_0^3 + 2(1 - \varepsilon_0) (a_1 + 2a_2 \varepsilon_0 + 3a_3 \varepsilon_0^2) \varepsilon / 3 +$$

$$+ 8(1 - \varepsilon_0)^2 (a_2 + 3a_3 \varepsilon_0) \varepsilon^2 / 15 + 16(1 - \varepsilon_0)^3 a_3 \varepsilon^3 / 35 \quad (1.5)$$

де $\varepsilon_0, \varepsilon$ - показники відносного обтиснення полоси, що прокатується, досягнуті в попередньому і аналізованому проходах відповідно.

За наявності відпаленого металу ($\varepsilon_0=0$) залежність (1.5) суттєво спроститься:

$$\sigma_{Tc} = a_0 + 2a_1 \varepsilon / 3 + 8a_2 \varepsilon^2 / 15 + 16a_3 \varepsilon^3 / 35. \quad (1.6)$$

У цілому представлена залежність (1.2) разом із рішеннями (1.3)-(1.6), отриманими на їх основі, склали повний алгоритм розрахунку механічних властивостей металів і сплавів при холодній деформації з урахуванням їх деформаційного зміцнення.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути ЕОМ та очікувати завантаження операційної системи.
2. Після завантаження операційної системи викликати потрібне лінгвістичне забезпечення.
3. Набрати і налагодити програму з автоматизованого розрахунку коефіцієнтів регресії для матеріалів із порядковим номером N, рівним порядковому номеру студента у журналі викладача.
4. Запустити програму виконання.
5. Ввести вихідні дані і провести розрахунок.
6. Скласти звіт про виконану роботу та зробити висновок.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип побудови кривих зміцнення.
2. У чому полягає фізичний зміст залежності межі текучості від відносного обтиснення?
3. Чим характеризуються показники механічних властивостей матеріалу при холодній прокатці?
4. Поясніть явище зміцнення та його природу.
5. На основі яких випробувань можна отримати дані про механічні властивості металів і сплавів?

Лабораторна робота 2 Математичне моделювання енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки

Завдання: Провести автоматизований розрахунок енергосилових параметрів гарячої прокатки матеріалу, порядковий номер якого (див. Додаток А, табл. А.1) відповідає порядковому номеру студента у журналі викладача. Як параметр, що варіюється, необхідно використовувати величину відносного обтиснення в діапазоні $\epsilon=0,0\dots0,4$, при цьому студенти, що мають непарні порядкові номери виконують розрахунки для трьох значень температур: $t = 800^{\circ}\text{C}$; $t = 900^{\circ}\text{C}$; $t = 1000^{\circ}\text{C}$, а студенти, які мають парні порядкові номери, — для трьох значень швидкості прокатки: $V_1=1$ м/с; $V_1 = 3$ м/с; $V_1 = 5$ м/с. Інші відсутні вихідні дані представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки

Найменування параметру	Позначення у програмі	Одиниці виміру	Значення
Вихідна товщина заготовки	h_0	мм	20
Ширина заготовки	b	мм	2000
Радіус робочих валків	R	мм	500

Температура металу, що прокатується	T	°C	900
Коефіцієнт зовнішнього тертя	f	-	0,25
Швидкість прокатки	V ₁	м/с	3
Питомі напруження заднього натяжіння	S ₀	-	0
Питомі напруження переднього натяжіння	S ₁	-	0
Щільності матеріалу, що прокатується	ρ	кг/м ³	7800

Короткі теоретичні відомості

У самому загальному випадку, враховуючи специфіку умов реалізації процесу гарячої прокатки щодо широких листів і полос, як вихідні дані стосовно автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів даного процесу (рис. 2.1) можуть бути використані наступні параметри:

h_0 - вихідна товщина заготівлі в даному проході;

h_1 - кінцева товщина заготовки у цьому проході;

b - ширина листа або полоси, що прокатується;

R - радіус робочих валків прокатного стану;

t - температура металу, що прокочується;

σ_{T0} , a_1 , a_2 , a_3 – коефіцієнти, що характеризують рівень механічних властивостей матеріалу полоси та їх залежність від ступеня, швидкості та температури деформації (див. Додаток А, табл. А.1);

f - коефіцієнт зовнішнього тертя в осередку деформації;

V_1 - швидкість прокатки, що відповідає швидкості переміщення металу в перерізі на виході з осередку деформації;

$S_1 = \frac{\sigma_1}{2K_c}$; $S_0 = \frac{\sigma_0}{2K_c}$ - питомі напруження переднього та заднього натя-

жіння відповідно;

ρ - показник щільності матеріалу, що прокатується.

Послідовність розрахунку енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки буде виглядати наступним чином [1].

Визначають величину абсолютного Δh та відносного ε обтиснення полоси (див. рис. 2.1):

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

$$\varepsilon = \Delta h / h_0; \quad (2.2)$$

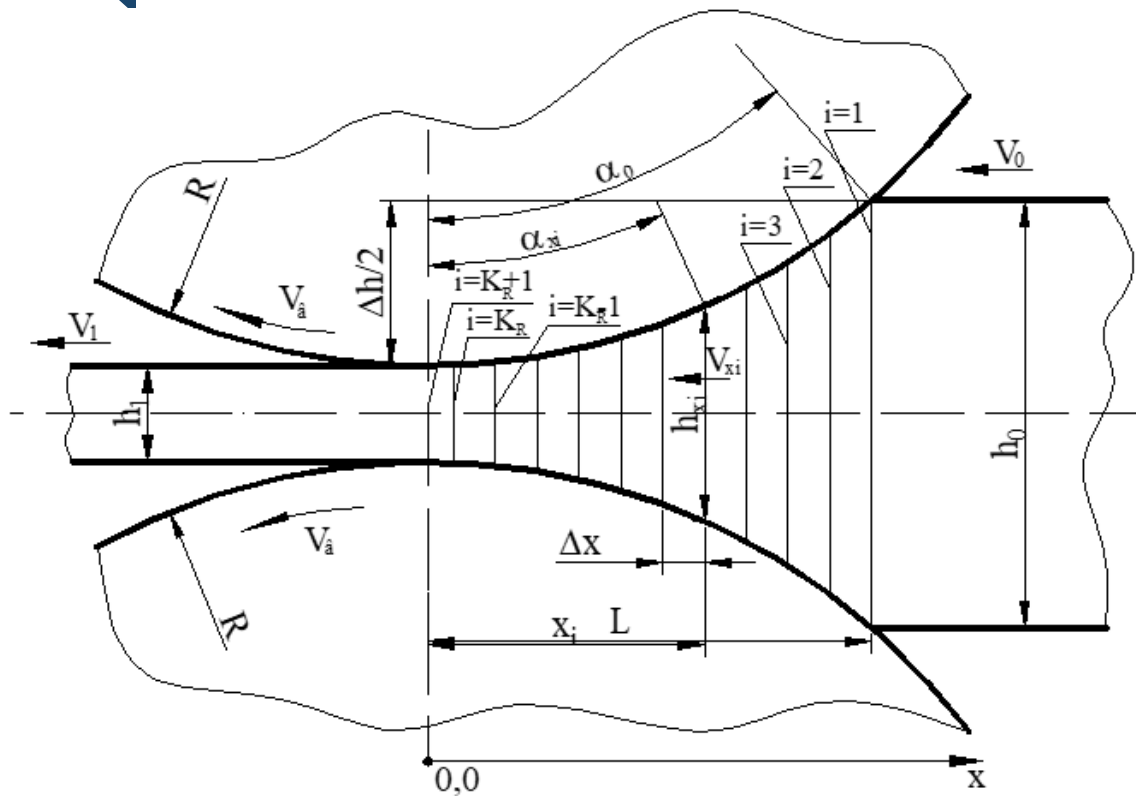


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема осередку деформації при реалізації процесу прокатки

Довжину дуги контакту L і середнє значення товщини полоси в осередку деформації h_{cp} :

$$L = \sqrt{R\Delta h + \Delta h^2 / 4}; \quad (2.3)$$

$$h_{cp} = 0,5(h_0 + h_1). \quad (2.4)$$

Проводимо розрахунок кута захвату α_0 [1]:

$$\alpha_0 = \arccos[1 - \Delta h / (2R)]. \quad (2.5)$$

З урахуванням деформаційних та кінематичних характеристик, на основі формули А.І. Целікова визначають середньоінтегральне значення швидкості деформації U_c [1]:

$$U_c = V_1 \varepsilon / L, \quad (2.6)$$

після чого на основі методики Л.В. Андріюка [7] проводять розрахунок середньоінтегрального значення подвоєного опору зсуву металу полоси, що прокатується $2K_c$:

$$2K_c = 1,155 \sigma_{T0} (6,67 \varepsilon)^{a_1} U_c^{a_2} (t/1000)^{a_3}. \quad (2.7)$$

Переходячи до визначення безпосередньо основних енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки, проводять розрахунок коефіцієнта напруженого стану n_{σ_1} , що характеризує вплив зовнішніх зон та контакт-ного тертя:

$$n_{\sigma_1} = 1 + 1,5(1 - L/h_{cp})^3 \text{ при } L/h_{cp} \leq 1; \quad (2.8)$$

$$n_{\sigma_1} = 1 + 0,2(L/h_{cp} - 1) \text{ при } 1 < L/h_{cp} \leq 2,5; \quad (2.9)$$

$$n_{\sigma_1} = 1 + 0,5 \cdot f \cdot (L/h_{cp} - 1) \text{ при } 2,5 < L/h_{cp}. \quad (2.10)$$

Визначають величину коефіцієнта напруженого стану n_{σ_2} , який характеризує вплив напружень переднього та заднього натягнення:

$$n_{\sigma_2} = 1 - 0,5 \left(\frac{\sigma_0}{2K_c} + \frac{\sigma_1}{2K_c} \right), \quad (2.11)$$

після чого визначають середньоінтегральне по довжині осередка деформації значення нормальних контактних напружень:

$$P_{cp} = 2K_c n_{\sigma_1} n_{\sigma_2}, \quad (2.12)$$

а разом із цим і величину повного зусилля прокатки:

$$P = P_{cp} b \cdot L. \quad (2.13)$$

Величину сумарного по відношенню до обох валків моменту прокатки M_{np} визначають за формулою:


$$M_{np} = 2P\psi L, \quad (2.14)$$

де ψ - коефіцієнт плеча прикладення рівнодіючої нормальних контактних напружень, що визначається як:

$$\psi = 0,6 - 0,3(0,5 - L/h_{cp})^2 \text{ при } 0,2 \leq L/h_{cp} < 0,7; \quad (2.15)$$

$$\psi = 0,6 - 0,15\sqrt{L/h_{cp} - 0,7} \text{ при } 0,7 < L/h_{cp} < 2,5; \quad (2.16)$$

$$\psi = 0,404 - 0,022\sqrt{L/h_{cp} - 2,5} - 0,252\alpha_0 \text{ при } 2,5 \leq L/h_{cp}. \quad (2.17)$$



І, нарешті, з урахуванням відомого значення повного моменту M_{np} визначають величину потужності прокатки:

$$N_{np} = M_{np} \frac{V_1}{R}, \quad (2.18)$$

а також величину питомої енергоємності процесу $A_{уд}$, характеризує витрату енергії в осередку деформації стосовно виробництва однієї тони готового металопрокату:

$$A_{уд} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{M_{np}}{Rbh_1} + \sigma_1 - \sigma_0 \right) \quad (2.19)$$

де $\sigma_0 = S_0 \cdot 2K_c$, $\sigma_1 = S_1 \cdot 2K_c$ - значення напруження заднього і переднього натягіння відповідно.

Загалом залежності (2.1)-(2.19) склали повний алгоритм автоматизованого розрахунку основних енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки щодо широких листів і полос. Блок-схема алгоритму розрахунку представлена рис. 2.2.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути ЕОМ та очікувати завантаження операційної системи.
2. Після завантаження операційної системи викликати потрібне лінгвістичне забезпечення.
3. Провести автоматизований розрахунок енергосилових параметрів гарячої прокатки матеріалу, порядковий номер якого відповідає порядковому номеру студента у журналі викладача.
4. Запустити програму виконання.
5. Ввести вихідні дані і провести розрахунок.
6. Скласти звіт про виконану роботу та зробити висновок.

Контрольні запитання

1. Назвіть умови протікання процесу прокатки в гарячому стані.
2. В чому полягає алгоритм розрахунку основних енергосилових параметрів при гарячій прокатці?
3. Опишіть вплив величин переднього та заднього натягіння на визначення коефіцієнту напруженого стану.
4. З якою метою визначають величину питомої енергоємності процесу?
5. Які параметри варіювання передбачає даний алгоритм розрахунку?

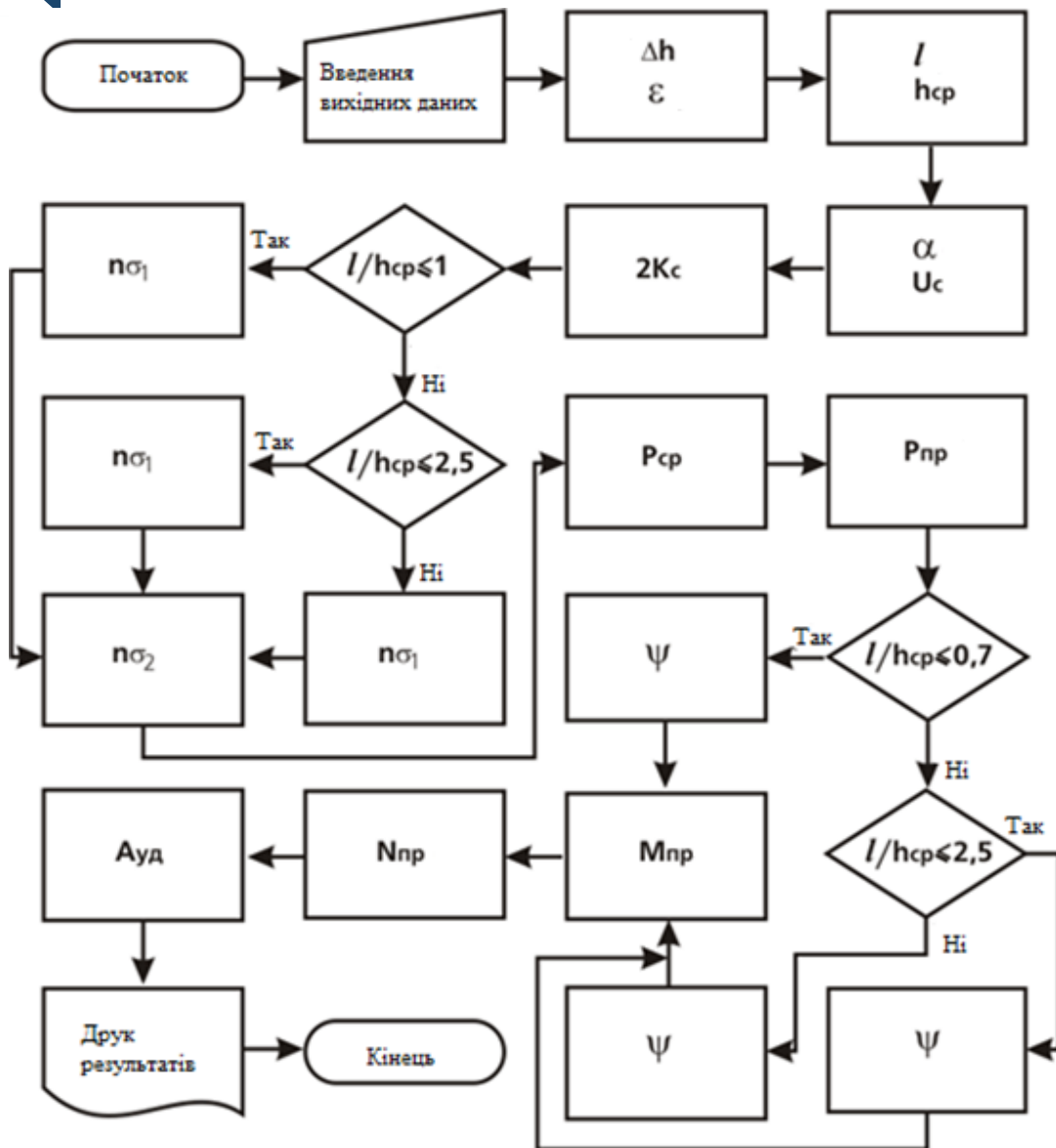


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму розрахунку енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки

Лабораторна робота 3 Математичне моделювання енергосилових параметрів процесу холодної прокатки

Завдання: Провести автоматизовані розрахунки для холодної прокатки сталі, порядковий номер якої (див. Додаток А, табл. А.2) відповідає порядковому номеру студента в журналі викладача. Як параметр, що варіюється, необхідно використовувати величину відносного обтиснення в діапазоні $\epsilon=0,0\dots0,4$, при цьому студенти, що мають непарні порядкові номери виконують розрахунки для трьох значень коефіцієнта зовнішнього тертя $f=0,06$; $f=0,09$; $f=0,12$, а студенти, що мають парні порядкові номери - для трьох значень питомого напруження переднього та заднього натягіння $S_1= S_0 = 0,0$; $S_1 = S_0 = 0,2$; $S_1 = S_0 = 0,4$. Інші відсутні вихідні дані

представлені в табл. 3.1. Побудувати графічні інтерпретації залежності сили та моменту прокатки від величини відносного обтиснення, тобто $P=F(\varepsilon)$ та $M_{пр}=F(\varepsilon)$.

Таблиця 3.1 - Вихідні дані з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу холодної прокатки

Найменування параметру	Позначення у програмі	Одиниці виміру	Значення
Вихідна товщина заготовки	h_0	мм	1,0
Ширина заготовки	b	мм	300
Степінь попередньої деформації	ε_0	-	0
Радіус робочих валків	R	мм	100
Модуль пружності валків	E_B	Н/мм ²	210000
Коефіцієнт Пуассона матеріалу робочих валків	ν_B	-	0,3
Коефіцієнт зовнішнього тертя	f	-	0,09
Швидкість прокатки	V_1	м/с	10
Питомі напруження заднього натягіння	S_0	-	0,2
Питомі напруження переднього натягіння	S_1	-	0,2
Щільності матеріалу, що прокатується	ρ	кг/м ³	7800

Короткі теоретичні відомості

З урахуванням зазначених вище вихідних даних, а також з урахуванням відомих досить широко апробованих методик, математичне забезпечення по автоматизованому розрахунку енергосилових параметрів процесу холодної прокатки може бути представлено в наступному вигляді.

Визначають величину абсолютного Δh і відносного ε обтиснення полоси в даному проході:

$$\Delta h = h_0 - h_1; \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \Delta h / h_0; \quad (3.2)$$

З урахуванням відомих значень коефіцієнтів регресії a_0, a_1, a_2, a_3 (див. Додаток А, табл. А.2) визначають середньоінтегральний по довжині осередка деформації подвоєний опір зсуву матеріалу, що прокатується [6]:

$$2K_c = 1,155 \left[\sigma_0 + a_1 \varepsilon_0 + a_2 \varepsilon_0^2 + a_3 \varepsilon_0^3 + (2/3)(1 - \varepsilon_0)(a_1 + 2a_2 \varepsilon_0 + 3a_3 \varepsilon_0^2) \cdot \varepsilon + (8/15)(1 - \varepsilon_0)^2 (3a_3 \varepsilon_0) \varepsilon^2 + (15/75)(1 - \varepsilon_0)^3 a_3 \varepsilon^3 \right]. \quad (3.3)$$

Потім за формулою А.І. Целікова [1] роблять розрахунок коефіцієнта напруженого стану:

$$n_\sigma = \frac{1}{\Delta h} \left\{ \xi_0 \frac{f}{\delta - 2} \left[\left(\frac{h_0}{h_n} \right)^{(\delta-2)} - 1 \right] + \xi_1 \frac{f}{\delta + 2} \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^{(\delta+2)} - 1 \right] \right\}, \quad (3.4)$$

де ξ_0, ξ_1 - коефіцієнти, що враховують вплив, відповідно, заднього та переднього натягіння полоси:

$$\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{2K_c} = 1 - \frac{S_0 2K_c}{2K_c} = 1 - S_0; \quad \xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{2K_c} = 1 - \frac{S_1 2K_c}{2K_c} = 1 - S_1;$$

$\delta = 2f \cdot L_0 / \Delta h$ - коефіцієнт, що характеризує граничні умови в осередку деформації;

$L_0 = \sqrt{R\Delta h - \Delta h^2 / 4}$ - довжина дуги контакту без урахування пружного сплющування робочих валків;

h_n - товщина полоси у нейтральному перерізі,

$$h_H = \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_1} h_0^{\delta-1} \cdot h_1^{\delta+1}}; \quad (3.5)$$

Виходячи з відомих значень $2K_c$ та n_σ , визначимо середньоінтегральне значення нормальних контактних напружень:

$$P_{cp} = 2K_c n_\sigma, \quad (3.6)$$

а разом із цим і величину сили прокатки:

$$P_{np} = P_{cp} \cdot b \cdot L_c. \quad (3.7)$$

Стосовно специфіки розрахунку процесу холодної прокатки, що полягає в необхідності обліку пружного сплющування робочих валків, слід зазначити, що власне довжина дуги контакту L_c у цьому випадку може бути визначена на основі відомого рішення Хічкока [1]:

$$L_c = \sqrt{R\Delta h + x^2} + x, \quad (3.8)$$

де $x = 8RP_{cp} \frac{1 - \nu_6^2}{\pi E_6}$ - допоміжний параметр.

Тут слід вказати на те, що внаслідок наявності функціонального взаємозв'язку довжини дуги контакту та середньоінтегрального значення нормальних контактних напружень, тобто $L_c = F(P_{cp})$ та $P_{cp} = F(L_c)$ безпосереднє визначення даних параметрів можна здійснити з урахуванням послідовних наближень.

Принаймні збіжності ітераційного рішення визначають сумарний момент, тобто момент прокатки, що припадає на обидва робочих валка:

$$M_{np} = 2 \left\{ \xi_0 \frac{h_0}{\delta - 2} \left[\left(\frac{h_0}{h_n} \right)^{\delta - 2} - 1 \right] + \xi_1 \frac{h_1}{\delta + 2} \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^{\delta + 2} - 1 \right] \frac{2K_c f \cdot R \cdot b \cdot L_c}{\Delta h} \right\}; \quad (3.9)$$

Визначають інтегральні значення переднього та заднього натягіння полоси:

$$T_1 = S_1 2K_c h_1 b; \quad T_0 = S_0 2K_c h_0 b; \quad (3.10)$$

після чого за аналогією з процесом гарячої прокатки роблять розрахунок потужності:

$$N_{np} = M_{np} \frac{V_1 h_1}{R h_n}, \quad (3.11)$$

а також розрахунок питомої енергоємності аналізованого процесу:

$$A_{yo} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{M_{np}}{R \cdot b \cdot h_1} + \sigma_1 - \sigma_0 \right), \quad (3.12)$$

де ρ - щільність матеріалу, що прокатується;

$\sigma_0 = S_0 \cdot 2K_c$, $\sigma_1 = S_1 \cdot 2K_c$ - значення напружень заднього та переднього натягіння відповідно.

Залежності (3.1)-(3.12) склали алгоритм з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу холодної прокатки щодо тонких листів і полос. Блок-схема даного алгоритму представлена рис. 3.1.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути ЕОМ та очікувати завантаження операційної системи.
2. Після завантаження операційної системи викликати потрібне лінгвістичне забезпечення.

3. Провести автоматизований розрахунок енергосилових параметрів холодної прокатки матеріалу, порядковий номер якого відповідає порядковому номеру студента у журналі викладача.
4. Запустити програму виконання.
5. Ввести вихідні дані і провести розрахунок.
6. Скласти звіт про виконану роботу та зробити висновок.

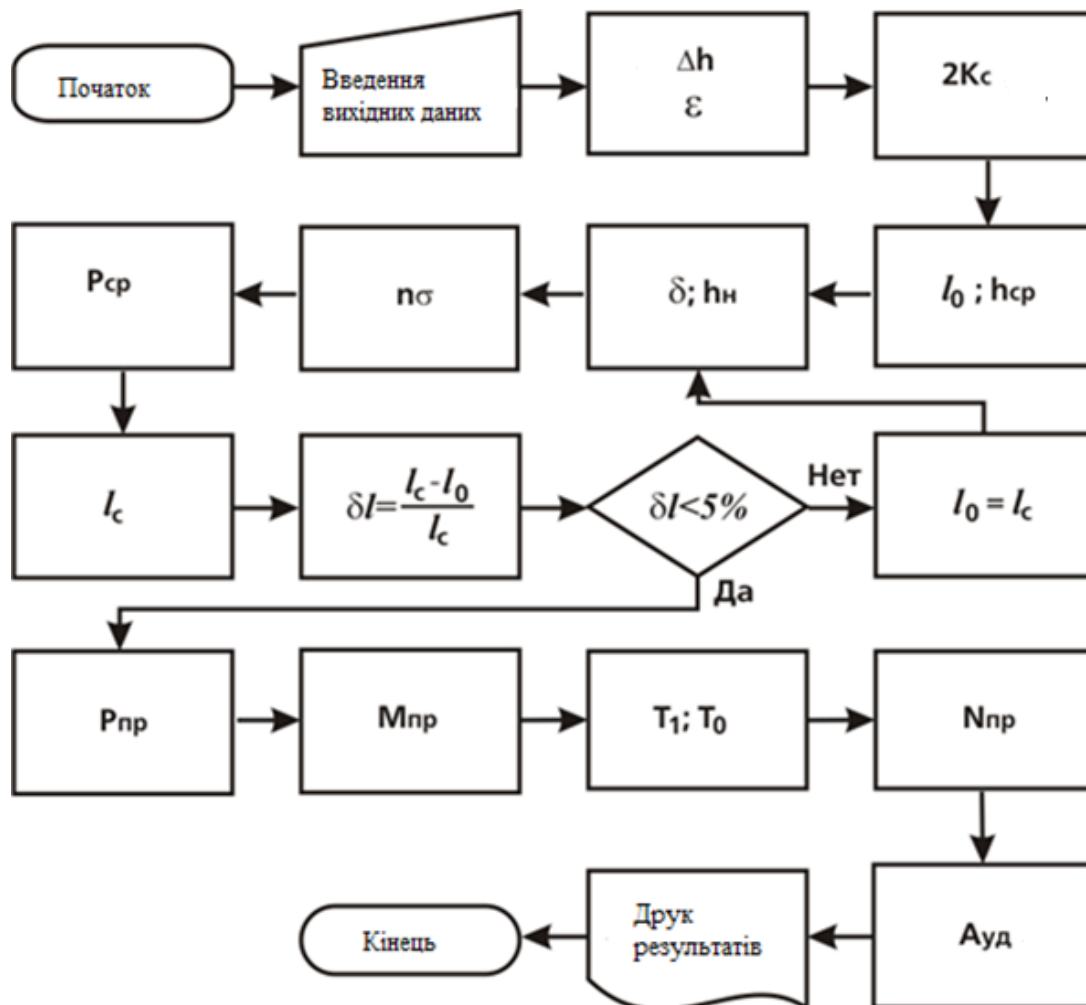


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму розрахунку енергосилових параметрів процесу холодної прокатки щодо широких листів та полос

Контрольні запитання

1. Назвіть умови протікання процесу прокатки в холодному стані.
2. В різниця розрахунку основних енергосилових параметрів при холодній прокатці від гарячої прокатки?
3. Як впливає значення моменту прокатки на величину потужності прокатки?
4. За рахунок чого зі збільшенням величини обтиснення зростає сила прокатки?
5. Які параметри варіювання передбачає даний алгоритм розрахунку?

Лабораторна робота 4

Математичне моделювання, розробка, наладка та чисельна реалізація програмних засобів з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесів гарячої та холодної прокатки відносно товстих листів та полос на основі методу верхньої оцінки

Завдання: закріплення теоретичних основ щодо використання методу верхньої оцінки у його чисельній інтерпретації та набуття практичних навичок з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесів гарячої та холодної прокатки на основі даного методу.

Короткі теоретичні відомості:

Використання методу верхньої оцінки при розрахунку різних технологічних схем обробки металів тиском полягає в побудові та подальшому кількісному аналізі кінематично можливих полів швидкостей. Розрахункова схема такого поля для верхньої половини осередка деформації процесу прокатки відносно товстих листів і полос представлена на рис. 4.1 і включає в себе три жорсткі зони, а саме, жорстка зона правіше лінії ac , що переміщається з вихідною швидкістю V_0 , жорстка зона acd , що переміщається зі швидкістю, що відповідає окружній швидкості робочих валків V_b і жорстка зона лівіше лінії cd , що переміщається з кінцевою швидкістю V_1 . Провівши осі X та Y у фізичній площині годографа, як це показано на рис. 4.1 і задавшись попередньо протяжністю відрізка h_x , визначили геометричні координати особливих точок a, c, d :

$$x_a = L; \quad y_a = h_0 / 2; \quad (4.1)$$

$$x_c = L_{0c}; \quad y_c = 0,0; \quad (4.2)$$

$$x_d = 0,0; \quad y_d = h_1 / 2, \quad (4.3)$$

де $L = \sqrt{R\Delta h + \Delta h^2 / 4}$ – довжина осередку деформації.

Характеристики кута β_1 та β_2 у цьому випадку будуть:

$$\beta_1 = \arctg[y_a / (x_a - x_c)]; \quad \beta_2 = \arctg(y_d / x_c). \quad (4.4)$$

Проставивши дані характеристик кутів на площині годографу (див. рис. 4.1, б), з урахуванням паралельності ліній ac та 12 , cd та 23 , а також ad та 13 та задавшись масштабним значенням початкової швидкості V_0 , визначаємо геометричні координати особливих точок 1, 2, 3:

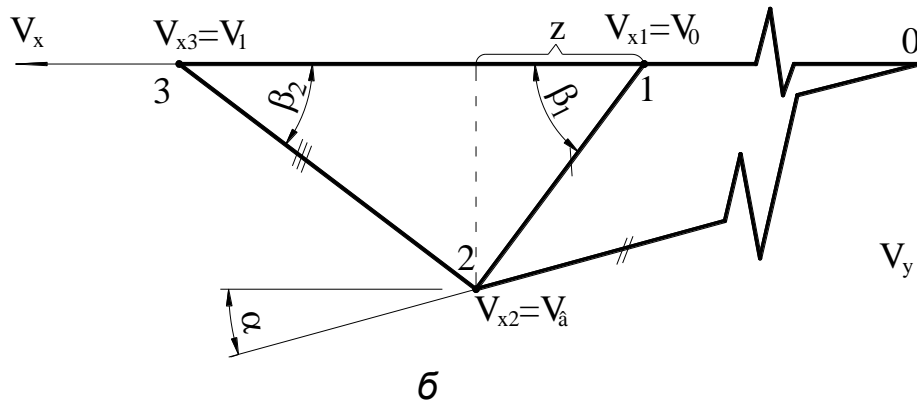
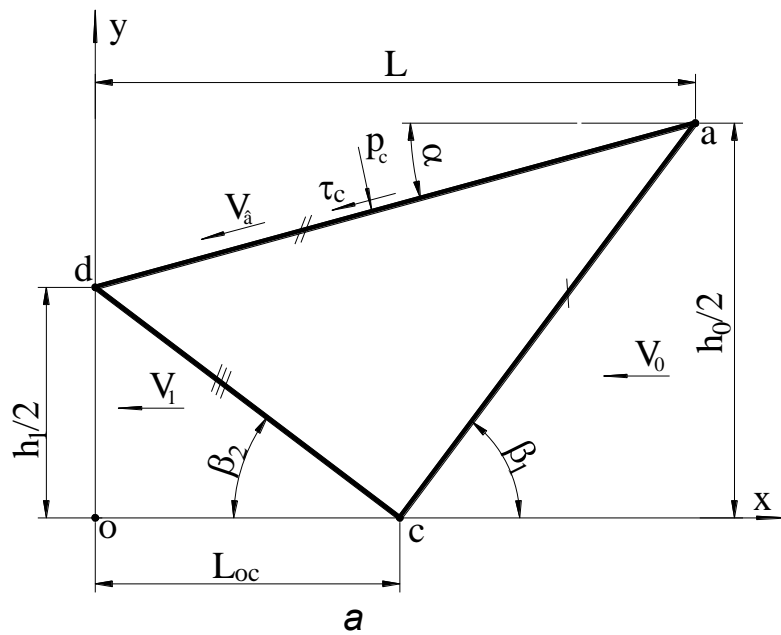


Рисунок 4.1 – Кінематично можливі поля

$$V_{x1} = V_0; \quad V_{y1} = 0,0; \quad (4.5)$$

$$V_{x3} = V_1 = V_0 h_0 / h_1; \quad V_{y3} = 0,0. \quad (4.6)$$

Для визначення координат особливої точки 2 введемо допоміжний параметр z , з урахуванням цього:

$$V_{y2} = z \operatorname{tg} \beta_1 (V_{x3} - V_{x1} - z) \operatorname{tg} \beta_2, \quad (4.7)$$

звідси

$$z = (V_{x3} - V_{x1}) \operatorname{tg} \beta_2 / (\operatorname{tg} \beta_1 + \operatorname{tg} \beta_2), \quad (4.8)$$

з урахуванням цього:

$$V_{x2} = V_{x1} + z = V_{x1} + (V_{x3} - V_{x1}) \operatorname{tg} \beta_2 / (\operatorname{tg} \beta_1 + \operatorname{tg} \beta_2); \quad (4.9)$$

$$V_{y2} = z \operatorname{tg} \beta_1 = (V_{x3} - V_{x1}) \operatorname{tg} \beta_1 \operatorname{tg} \beta_2 / (\operatorname{tg} \beta_1 + \operatorname{tg} \beta_2). \quad (4.10)$$

З урахуванням відомих координат особливих точок і в фізичній площині (див. рис. 4.1,а) і в площині годографу (див. рис. 4.1,б) приведена до одиниці ширини полоси потужність пластичного формозмінення може бути визначена як:

$$\begin{aligned} N_{\phi} &= K_c (L_{ac} L_{12} + L_{cd} L_{23}) = \\ &= K_c \left[\sqrt{(x_a - x_c)^2 + y_a^2} \sqrt{(V_{x2} - V_{x1})^2 + V_{y2}^2} + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{x_c^2 + y_d^2} \sqrt{(V_{x3} - V_{x2})^2 + V_{y2}^2} \right], \end{aligned} \quad (4.11)$$

де K_c – середньоінтегральне по довжині осередку деформації значення опору зсуву, що визначається залежністю з (2.7) при гарячій або залежністю (3.3) при холодній прокатці.

Слід відзначити те, що з усіх можливих кінематично можливих полів швидкостей, що було вже зазначено раніше, змінюється на протязі всієї довжини L_{oc} (див. рис. 4.1,а), коректним є тільки одне, яке відповідає мінімуму потужності пластичного формозмінення. Зазначене потребує побудови 1-го масиву полів швидкостей в діапазоні $0,0 < L_{0ci} < L$ з наступним визначенням i -го поля, для якого значення $N_a = N_{\phi min}$ є мінімальним. По мірі визначення $N_{\phi min}$, враховуючи, що вся активна енергія вводиться в осередок деформування дотичними контактними напруженнями зі сторони робочих валків їх середньоінтегральне значення τ_c може бути визначене як:

$$\tau_c = N_{\phi min} \cos \alpha / (L V_{\phi}) = N_{\phi min} \cos \alpha / (L \sqrt{V_{x2}^2 + V_{y2}^2}), \quad (4.12)$$

а з умови рівноваги проєкцій всіх сил на вісь x величина середньоінтегральних значень нормальних контактних напружень p_c складе:

$$p_c = \tau_c / \operatorname{tg} \alpha = N_{\phi min} \cos \alpha / (L \operatorname{tg} \alpha \sqrt{V_x^2 + V_y^2}), \quad (4.13)$$

де $\alpha = \arctg[(h_0 - h_1) / 2L]$ – кут нахилу хорди, що апроксимує контактну поверхню робочого валку до горизонталі (див. рис. 4.1).

З урахуванням (4.12) та (4.13) і ширини полоси b можуть бути визначені величина сили P та сумарний момент M прокатки:

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути ЕОМ та очікувати завантаження операційної системи.
2. Після завантаження операційної системи викликати потрібне лінгвістичне забезпечення.
3. Набрати і налагодити програму з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесів гарячої і холодної прокатки щодо товстих листів і полос на основі методу верхньої оцінки.
4. Запустити програму виконання.
5. Ввести вихідні дані і провести розрахунок процесу прокатки матеріалу, порядковий номер якого відповідає порядковому номеру студента в журналі викладача. При цьому студенти, які мають непарні порядкові номери, виконують розрахунок гарячої прокатки за даними лабораторної роботи №2, а студенти, які мають парні номери, – розрахунок холодної прокатки за даними лабораторної роботи №3.
6. Занести результати розрахунків у таблицю і побудувати графічні інтерпретації залежності приведеної потужності пластичного формозмінення від протяжності відрізка L_{oc} і зробити висновки по роботі.
7. Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Поясніть методику пошуку найменших значень у масиві.
2. У чому полягає метод верхньої оцінки?
3. Поясніть принцип побудови кінематично можливих полів швидкостей у фізичній площині і площині годографа.
4. Як визначити швидкість переміщення жорстких зон?
5. Як визначити положення характерної точки C ?

Лабораторна робота 5

Математичне моделювання та програмні засоби з автоматизованого розрахунку поточних по довжині осередку деформування геометричних, кінематичних та деформаційних показників процесу прокатки

Завдання: закріплення теоретичних основ та набуття практичних навичок з розробки, налагодження та чисельної реалізації програмних засобів з автоматизованого розрахунку поточних значень геометричних, кінематичних та деформаційних параметрів осередка деформації процесу прокатки.

Короткі теоретичні відомості

Процесом прокатки називають процес безперервної у часі пластичної деформації металу між двома циліндричними валками, що обертаються у різні боки. При прокатці відносно тонких і широких листів та полос уширення, тобто збільшення ширини b у відносних вимірах є вкрай



Таблиця 5.1 - Вихідні дані з автоматизованого розрахунку геометричних, кінематичних та деформаційних параметрів осередка деформації процесу прокатки.

Найменування параметру	Позначення у програмі	Одиниці виміру	Значення
Вихідна товщина заготовки	h_0	мм	$1,0+0,1N_0^*$
Степінь попередньої деформації	ε	-	0
Радіус робочих валків	R	мм	$75+5N_0$
Швидкість прокатки	V_1	м/с	$10-0,3N_0$

*варіант за номером журналу

незначним і при розрахунках ним нехтують, а кінематику пластичної течії розглядають з позицій гіпотези плоских перерізів [1]. З огляду на це структуру осередка деформації (див. рис. 2.1) в інтегральному плані характеризують такими параметрами:

- абсолютне обтиснення полоси:

$$\Delta h = h_0 - h_1; \quad (5.1)$$

- витяжка полоси:

$$\lambda = h_0 / h_1; \quad (5.2)$$

- степінь відносного обтиснення:

$$\varepsilon_1 = (h_0 - h_1) / h_0 = \Delta h / h_0 = 1 - 1 / \lambda; \quad (5.3)$$

- результуюча степінь відносного обтиснення з урахуванням деформації в попередніх проходах:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0) \varepsilon_1 \quad (5.4)$$

- степінь логарифмічної деформації в даному проході:

$$\dot{\varepsilon} = \lg(h_0 / h_1) = \ln \lambda = \ln[1 / (1 - \varepsilon)]; \quad (5.5)$$

- вихідна швидкість прокатки, тобто швидкість переміщення металу в перерізі на вході в осередок деформування, що витікає з умови постійності об'ємів [1]:

$$V_0 = V_1 h_1 / h_0; \quad (5.6)$$

- величина кута захвату:

$$\alpha_0 = \arccos[1 - \Delta h / (2R)]; \quad (5.7)$$

- довжина осередка деформації:

$$L = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2} = \sqrt{R\Delta h - \Delta h^2 / 4}; \quad (5.8)$$

- середньоінтегральне значення швидкості деформації [1]:

$$U_c = V_1 \varepsilon_1 / L. \quad (5.9)$$

- середньоінтегральне значення межі текучості:

$$\sigma_{TC} = \sigma_0 + a_1 \varepsilon_0 + a_2 \varepsilon_1^2 + l \varepsilon_0^3 2(1 - \varepsilon_0)(a_1 + 2a_2 \varepsilon_0 + 3a_3 \varepsilon_0^2) \varepsilon / 3 + 8(1 - \varepsilon_0)^2 (a_2 + 3a_3 \varepsilon_0) l^2 / 15 + 16(1 - \varepsilon_0)^3 a_3 \varepsilon^3 / 35 \quad (5.10)$$

З метою визначення локальних, тобто поточних за координатою x (див. рис. 2.1) характеристик здійснимо розбивку всього осередка деформування на K_R елементарних об'ємів, що мають довжину $\Delta x = L / K_R$, а також граничні перерізи з постійними номерами $i = 1 \dots (K_R + 1)$. При цьому початок геометричної координати x має місце в перерізі виходу металу з валків, а відлік порядкових номерів здійснюється від початкового до кінцевого перерізів, тобто в напрямку переміщення полоси, що прокатується. З огляду на це початкові умови матимуть вигляд

$$x_{i|_{i=1}} = L; h_{xi|_{i=1}} = h_0; V_{xi|_{i=1}} = V_0; \varepsilon_{xi|_{i=1}} = 0,0, \quad (5.11)$$

а умови переходу:

$$x_{(i+1)} = x_i - \Delta x. \quad (5.12)$$

Виходячи з відомого поточного значення геометричної координати x_i можуть бути визначені поточні по довжині осередка деформації значення та всі інші параметри процесу прокатки [4], а саме:

- поточне значення кута контакту:

$$\alpha_{xi} = \arcsin(x_i / R); \quad (5.13)$$

- поточне значення товщини полоси, що прокатується:

$$\begin{aligned} h_{xi} &= h_1 + 2R(1 - \cos \alpha_{xi}) \\ h_{xi} &= h_1 + 2\left(R - \sqrt{R^2 - x_i^2}\right), \end{aligned} \quad (5.14)$$

- поточне значення швидкості переміщення матеріалу:

$$V_{xi} = h_1 V_1 / h_{xi}; \quad (5.15)$$

- час проходження елементарного об'єму:

$$\tau_{xi} = 2\Delta x / [V_{x(i-1)} + V_{xi}]; \quad (5.16)$$

- поточне значення степені відносного обтиснення в даному проході:

$$\varepsilon_{xi} = (h_0 - h_{xi}) / h_0; \quad (5.17)$$

- поточне значення логарифмічної деформації:

$$\varepsilon_{xi} = \ln(h_0 / h_{xi}); \quad (5.18)$$

- поточне значення середньоінтегральної швидкості деформації:

$$U_{\varepsilon_{xi}} = [\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{x(i-1)}] / \tau_{xi}; \quad (5.19)$$

- прискорення переміщення металу, що прокатується:

$$a_{xi} = [V_{xi} - V_{x(i-1)}] / \tau_{xi}; \quad (5.20)$$

- поточне значення результуючої степені деформації:

$$\varepsilon_{pxi} = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0)\varepsilon_{xi}. \quad (5.21)$$

Поточне значення межі текучості:

$$\sigma_{ТХі} = \sigma_{Т0} + a_1 \varepsilon_{pxi} + a_2 \varepsilon_{pxi}^2 + a_3 \varepsilon_{pxi}^3. \quad (5.22)$$

Таким чином, в результаті переходу від перерізу до перерізу в залежності від геометричної координати x_i можуть бути визначені всі поточні по довжині осередка деформації геометричні, кінематичні та деформаційні параметри процесу прокатки, а шляхом наступного чисельного підсумовування можуть бути визначені і середньоінтегральні значення ступеня та швидкості деформації в даному проході:

$$\varepsilon_{1c} = \sum_{i=1}^{(K_R+1)} \varepsilon_{xi} / (K_R + 1); U_c^* = \sum_{i=1}^{(K_R+1)} U_{xi} / (K_R + 1), \quad (5.23)$$

а також середньоінтегральне за довжиною осередка деформації значення межі текучості:

$$\sigma_{mc}^* = \sum_{i=1}^{(K_R+1)} \sigma_{mxi} / (K_R + 1). \quad (5.24)$$

В цілому, залежності (5.1)-(5.24) склали повний алгоритм з автоматизованого розрахунку та локальних, інтегральних показників геометрії та кінематики осередка деформації процесу прокатки щодо тонких листів та полос (рис. 5.1).

Порядок виконання роботи

1 Включити ЕОМ в мережу і після завантаження операційної системи ввести своє мережне ім'я і пароль.

2. Після входу в операційну систему завантажити файловий менеджер (наприклад, FAR manager), в якому завантажити потрібне лінгвістичне забезпечення.

3. Набрати та налагодити програму з автоматизованого розрахунку локальних та інтегральних параметрів осередка деформації процесу прокатки щодо тонких листів і полос.

4. Запустити програму виконання.

5. Ввести вихідні дані та зробити автоматизовані розрахунки. Коефіцієнти регресії, що характеризують інтенсивність деформаційного зміцнення прийняти за Додатком А, табл. А.1

Розрахунки зробити для трьох значень кінцевих товщин: $h_1 = (0,8h_0)$; $h_1 = (0,7h_0)$; $h_1 = (0,6h_0)$. Кількість розбиття прийняти рівним $KR=50$. Результати розрахунків поточних показників занести в табл. 5.2 і побудувати графіки їх зміни у залежності від співвідношення x_i/L .

7 Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Яким чином у лінгвістичному середовищі можуть бути отримані зворотні тригонометричні функції \arccos і \arcsin ?

2. Поясніть виведення формули для визначення довжини осередку деформації, а також для визначення логарифмічної деформації залежно від відносного обтиснення.

3. Сформулюйте гіпотезу плоских перерізів.

4. Вкажіть початкові умови та умови переходу при математичному моделюванні поточних показників осередка деформації процесу прокатки.

5. Як впливає швидкість прокатки і величина відносного обтиснення на швидкість деформації та інші локальні характеристики?

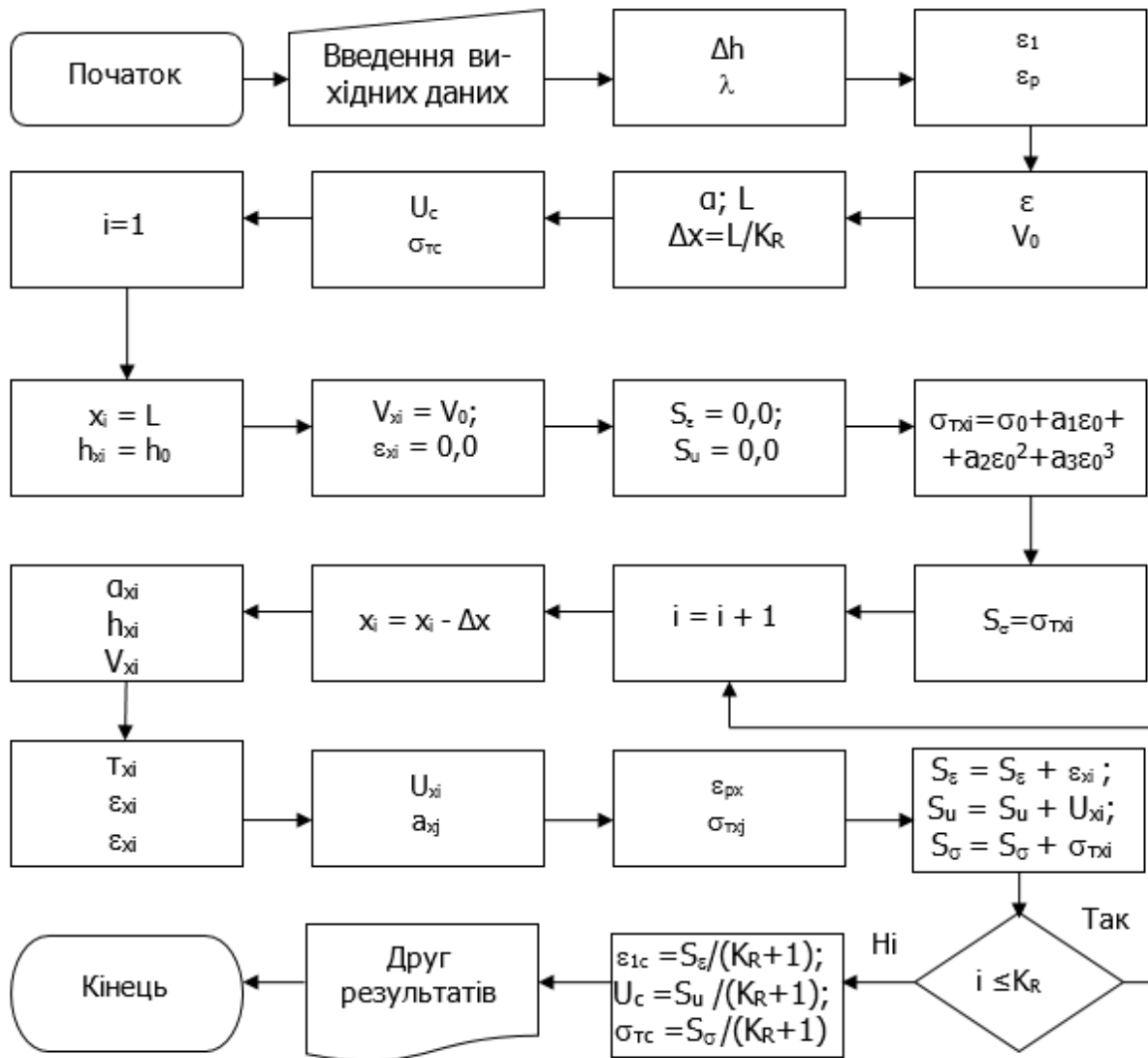


Рисунок 5.1 – Збільшена блок-схема автоматизованого розрахунку геометричних та кінематичних характеристик процесу прокатки

Таблиця 5.2 – Результати розрахунків поточних показників

h ₁	Параметр	Відносне значення геометричної координати x _i /L											
		0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
h ₁ =0,8h ₀	α _{xi} , (град.)												
	h _{xi} , мм												
	V _{xi} , м/с												
	τ _x , с												
	ε _{xi}												
	ε [*] _i												
	U _{xi}												
a _{xi}													
σ _{Txi}													
h ₁ =0,7h ₀	— —												
h ₁ =0,6h ₀	— —												



Лабораторна робота 6

Математичне моделювання, розробка, налагодження та чисельна реалізація програмних продуктів з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу дресировки тонких лент та полос

Завдання: придбання практичних навичок з автоматизованого розрахунку процесу дресировання та кількісний аналіз впливу вихідних параметрів даного процесу на величину його основних енергосилових параметрів.

Короткі теоретичні відомості

У загальному випадку для умови реалізації процесу дресировки характерним є наявність малих кутів захоплення і невелика величина відносного обтиснення ($\epsilon < 0,05$). За таких умов великий вплив на довжину зони контакту і характер зміни контактних напружень надають пружні деформації робочих валків і полоси.

З урахуванням викладеного вище для розробки методики розрахунку енергосилових параметрів процесу дресировання можуть бути використані результати вирішення двовимірної задачі про стиснення тонкої пружно-пластичної полоси між паралельними плитами при дотичних контактних напруженнях, пропорційних опору чистого зсуву K_{cp} [8]:

$$\tau = 2K_{cp}\mu = mK_{cp}, \quad (6.1)$$

де $m = 2\mu$ – допоміжний параметр, який використовується при подальших розрахунках;

μ – коефіцієнт пластичного тертя.

Довжина зони контакту при дресированні, що враховує пружну деформацію валків і полоси, може бути визначена як:

$$L_c = \sqrt{R(\delta + P(bQ_b))}, \quad (6.2)$$

де R – радіус робочих валків;

P – величина сили дресировання;

b – ширина полоси

Пружну постійну матеріалу робочих валків Q_b та приведену величину обтиснення δ , які є складовими частинами рівняння (6.2), обчислюють за такою формулою:

$$Q_b = \frac{\pi E_b}{16(1 - \nu_b^2)}; \quad (6.3)$$

$$\delta = \Delta h + 2\Delta^* + 2\sqrt{(\Delta h + \Delta^*)\Delta^*}, \quad (6.4)$$

де E_b, ν_b – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу робочих валків;

$\Delta h = h_0 - h_1$ – величина абсолютного обтиснення полоси;

h_0, h_1 – вихідне та кінцеве для даного проходу значення товщини оброблюваної полоси.

Зміна товщини полоси внаслідок розвантаження Δ^* за наявності пластичної деформації по всьому поперечному перерізі полоси визначають виходячи з виразу:

$$\Delta^* = \left(0,75 \frac{K_{cp}}{E_n} \right) A^* h_1, \quad (6.5)$$

де E – модуль пружності матеріалу полоси;

$$A^* = \sqrt{1 - m^2} + \frac{\arcsin m}{m}.$$

При розрахунку процесу дресування припускають, що полоса деформується пластично, коли в зоні деформації є ділянка, на якій пластична деформація проникає через всю товщину оброблюваної полоси. Зазначене, у свою чергу, спостерігається під час виконання наступної умови:

$$\frac{\Delta h}{h_0} \geq \frac{0,75 K_{cp}}{E_n} (2 - A^*). \quad (6.6)$$

Безпосередньо протяжність ділянки навантаження L_1 та розвантаження L_2 , а також протяжність пружної та пружно-пластичної деформації L_n в зоні навантаження, можуть бути в цьому випадку визначені як:

$$L_1 = \sqrt{(\Delta h + \Delta^*)L_c / \delta}; \quad (6.7)$$

$$L_2 = \sqrt{\Delta^* L_c / \delta}; \quad (6.8)$$

$$L_n = \frac{1,5 K_{cp} h_0 L_1}{E_n (\Delta h + \Delta^*)}. \quad (6.9)$$

Крім того, для розрахунку енергосилових параметрів процесу дресировки необхідним є визначення протяжності ще двох ділянок.:

$$x_a = \frac{\sigma_0}{2K_{cp} (m/h_0 + L/L_n)}; \quad (6.10)$$

$$x_b = \frac{\sigma_1}{2K_{cp} (m/h_1 + L/L_2)}, \quad (6.11)$$

а також визначення довжини ділянок a та b , що визначають положення точок, у яких нормальні контактні напруження досягають свого максимального значення:

$$a = \frac{h_0}{h_0 + h_1} L_c + \frac{(\sigma_0 - \sigma_1)h_0 h_1}{2K_{cp} m(h_0 + h_1)}; \quad (6.12)$$

$$b = \frac{h_1}{h_0 + h_1} L_c + \frac{(\sigma_0 - \sigma_1)h_0 h_1}{2K_{cp} m(h_0 + h_1)}, \quad (6.13)$$

де σ_1, σ_0 – напруження переднього та заднього натягіння полоси.

З урахуванням кількісних оцінок основних та допоміжних параметрів, що входять в залежності (6.14)-(6.15) безпосередньо величина сили дресування тонких лент і полос, може бути визначена як:

$$P = \frac{b}{2} \left[(2a - L_n)(2K_{cp} - \sigma_0) + (2b - L_2)(2K_{cp} - \sigma_1) + 2K_{cp} m \left(\frac{a^2}{h_0} + \frac{b^2}{h_0} \right) - \right. \\ \left. - x_a \left(\frac{2K_{cp} m}{h_0} L_n + 2K_{cp} - \sigma_0 \right) - x_b \left(\frac{2K_{cp} m}{h_1} L_2 + 2K_{cp} - \sigma_1 \right) \right], \quad (6.14)$$

Для визначення моменту дресування необхідно спочатку визначити питому енергоємність процесу:

$$A_{op} = \frac{p_{cp} \ln(h_0/h_1)}{j} = \frac{P \ln(h_0/h_1)}{bL_c j}, \quad (6.15)$$

а потім власне величину сумарного моменту виходячи з умови балансу енергетичних витрат:

$$M_{op} = R \left[p_{cp} b h_1 \ln(h_0/h_1) - \sigma_1 h_1 b + \sigma_0 h_0 b \right], \quad (6.16)$$



де $p_{cp} = P/(bL_c)$ – середньоінтегральне значення нормальних контактних напружень;
 j – показник щільності матеріалу полоси.

Загалом залежності (6.1)-(6.16) у поєднанні з розрахунком середньоінтегральної величини подвоєного опору зсуву склали повний алгоритм розрахунку енергосилових параметрів процесу дресування тонких лент і полос.

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ в мережу і після завантаження операційної системи ввести своє мережне ім'я і пароль.
2. Після входу в операційну систему завантажити файловий менеджер (наприклад, FAR manager), в якому завантажити потрібне лінгвістичне забезпечення.
3. Набрати та налагодити програму.
- 4 Запустити програму виконання.
5. Ввести вихідні дані та провести розрахунок процесу дресування матеріалу, порядковий номер якого відповідає порядковому номеру студента в журналі викладача. Початкова товщина полоси $0.8+0.02n$ (де n – порядковий номер за журналом викладача) ступінь деформації змінюється від 0 до 3%.
6. Занести результати розрахунків у таблицю та побудувати графічні інтерпретації залежності сили дресування та моменту дресування від ступеня деформації та зробити висновки по роботі.
7. Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. За допомогою яких операторів виробляється об'єм масивів?
2. Як впливає кількість розбиття на точність одержуваних результатів?
3. Вкажіть основні особливості процесу дресування.
4. Як визначається довжина осередка деформації при реалізації процесу дресування?
5. Які параметри мають найбільший вплив на силу дресування?
6. Поясніть фізичне значення коефіцієнта плеча.

Лабораторна робота 7

Автоматизоване проектування технологічних режимів обтиснення під час гарячої прокатки відносно широких листів і полос

Завдання: визначення початкової товщини прокату і часткових обтиснень за умовою максимального завантаження стану.

Таблиця 7.1 - Вихідні дані з автоматизованого проектування технологічних режимів процесу гарячої прокатки

Найменування параметру	Позначення у програмі	Одиниці виміру	Значення
Кількість проходів	n	–	3
Вихідна товщина	h_0	мм	$4+0,5N^*$
Ширина заготовки	b	мм	2000
Радіус робочих валків	R	мм	500
Температура металу, що прокатується	t	°C	900
Коефіцієнт зовнішнього тертя	f	-	0,25
Швидкість прокатки	V_1	м/с	3
Питомі напруження заднього натягіння	S_0	-	0,2
Питомі напруження переднього натягіння	S_1	-	0,2
Припустима сила прокатки	[P]	кН	10 000
Припустимий момент прокатки	[M]	кН·м	2 000
Припустима потужність прокатки	[N]	кВт	12 000

*порядковий номер студента в журналі викладача

Короткі теоретичні відомості

Оптимізація технологічних режимів роботи прокатних станів і, зокрема, оптимізація технологічних режимів обтиснень під час гарячої прокатки щодо широких листів і полос відноситься до найважливіших факторів, які забезпечують підвищення техніко-економічних показників процесу прокатного виробництва в цілому. При цьому знання оптимальних технологічних режимів обтиснень і відповідних їм енергосилових параметрів процесу прокатки є необхідним і з точки зору підвищення наукової обґрунтованості проектно-конструкторських рішень, які використовуються як при створенні нових, так і при модернізації діючих прокатних станів [9].

Безпосередньо в якості цільової функції при оптимізації технологічних режимів обтиснень була використана інженерна математична модель процесу гарячої прокатки [4].

Саме ж математичне забезпечення з розрахунку енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки може бути подано у вигляді сукупності аналітичних залежностей, що наведені у лабораторній роботі 2.

Описана математична модель була використана в якості функції при автоматизованому проектуванні технологічних режимів обтиснень, яка

була організована на виконання критерію повного завантаження механічного обладнання. Останнє, зокрема, знайшло своє відображення в системі прийнятих обмежень за максимально припустимими значеннями величини кута захоплення $[\alpha_i] = \arctg f$, сили $[P_i]$, моменту $[M_i]$ і потужності $[N_i]$ прокатки:

$$\alpha_i \leq [\alpha_i]; \quad P_i \leq [P_i]; \quad M_i \leq [M_i]; \quad N_i \leq [N_i], \quad (7.1)$$

де i – порядковий номер аналізованого проходу.

Програмне забезпечення вирішення поставленого завдання оптимізації було здійснено на основі алгоритмічного методу цілеспрямованого перебору варіантів. Аналітичний опис цього методу може бути подано в такому вигляді:

$$\Delta h_{i(k+2)} = \Delta h_{ik} + A_h \text{sign}\{[x_i] - x_{ik}\}, \quad (7.2)$$

де Δh_i – величина абсолютного обтиску смуги в i -му проході, мм;

k – порядковий номер чергового циклу ітераційної процедури вирішення;

A_h – крок зміни величини абсолютного обтиснення, кількісна оцінка якого може бути змінною залежно від ступеня наближення проміжних результатів до вихідного, тобто до оптимального значення;

$[x_i]$ – задані відповідно до (7.1) значення параметрів, безпосередньо пов'язаних з прийнятим критерієм оптимальності.

З огляду на викладене вище та виходячи з логіки функціональних зв'язків між величиною абсолютного обтиснення і енергосилових параметрів процесу прокатки, вирішення задачі оптимізації за умовою повного завантаження механічного обладнання можна записати у вигляді послідовних покрокових збільшень в разі одночасного виконання кожного з умов:

$$\Delta h_{i(k+1)} = \Delta h_{ik} + 0,05h_{0i}, \quad (7.3)$$

де h_{0i} – вихідна товщина смуги в i -му проході, мм.

У разі ж невиконання хоча б одного з обмежень (7.1) векторну спрямованість зміни величини абсолютного обтиску слід змінити на протилежну, змінивши одночасно і саму величину покрокового приросту:

$$\Delta h_{i(k+1)} = \Delta h_{ik} - 0,005h_{0i}. \quad (7.4)$$

Таким чином, на основі залежностей (7.3) і (7.4) може бути визначено абсолютне обтиснення, відповідне умові забезпечення максимально допустимого завантаження і, як наслідок, умовою досягнення максимальної продуктивності механічного обладнання конкретних прокатних станів. Блок-схема цього алгоритму зображена на рис. 7.1, при цьому з розрахунку одного з і-х проходів може бути виконано проектування подальшого (і + 1)-го проходу, виходячи з умови зв'язку за товщиною:

$$h_{0(i+1)} = h_{0i} + \Delta h_i. \quad (7.5)$$

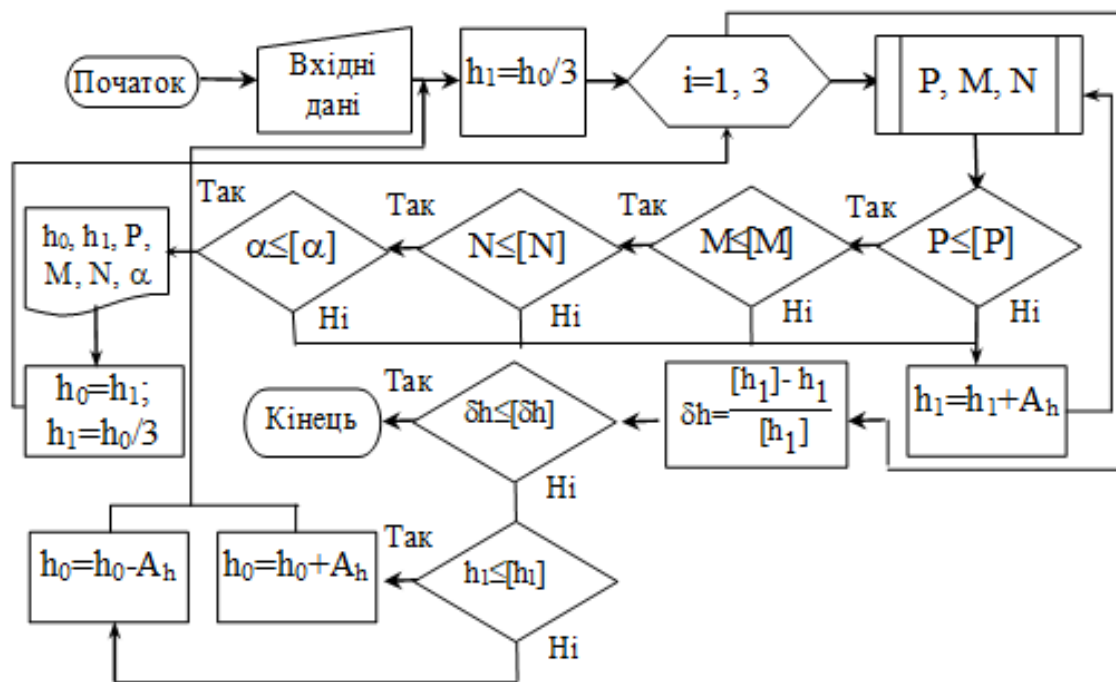


Рисунок 7.1 – Блок-схема автоматизованого проектування технологічних режимів обтиснень гарячої прокатки

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.
3. Набрати і налагодити програму.
4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому вихідні дані, які подані в табл. 7.1. Коефіцієнти, що характеризують механічні властивості матеріалу, що прокатується, взяти з таблиці А.1, наведеної в додатку А, враховуючи, що порядковий номер матеріалу відповідає порядковому номеру студента в журналі викладача.
5. Записати отримані результати.
6. Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Які параметри використовуються в якості критерію оптимальності режимів обтиснень процесу прокатки?
2. Дайте техніко-економічне обґрунтування використуваному критерію оптимальності.
3. Які методи можуть бути використані при пошуку оптимального рішення?
4. За рахунок зміни яких параметрів може бути забезпечена інтенсифікація технологічних режимів обтиску під час гарячої прокатки?
5. Поясніть умови зв'язку при переході від одного проходу до іншого.
6. Як оголошуються масиви в середовищі програмування?

Лабораторна робота 8

Автоматизоване проектування технологічних режимів обтиснення при холодній прокатці відносно тонких листів і полос

Завдання: визначення режимів обтиснень при холодній прокатці листів і смуг з умови повного завантаження стану.

Таблиця 8.1 - Вихідні дані з автоматизованого проектування технологічних режимів процесу холодної прокатки

Найменування параметру	Позначення у програмі	Одиниці виміру	Значення
Кількість проходів	n	–	3
Вихідна товщина	h_0	мм	$1+0,2N^*$
Ширина заготовки	b	мм	2000
Ступінь попередньої деформації	ϵ	-	0
Радіус робочих валків	R	мм	100
Коефіцієнт зовнішнього тертя	f	-	0,09
Швидкість прокатки	V_1	м/с	10
Питомі напруження заднього натягіння	S_0	-	0,2
Питомі напруження переднього натягіння	S_1	-	0,2
Припустима сила прокатки	$[P]$	кН	2 000
Припустимий момент прокатки	$[M]$	кН·м	1 000
Припустима потужність прокатки	$[N]$	кВт	8 000

*порядковий номер студента в журналі викладача.

Короткі теоретичні відомості

Як і в попередній лабораторній роботі, кінцевою метою автоматизованого проектування технологічних режимів холодної прокатки відносно тонких листів і полос буде визначення максимального значення вихідної товщини підкату з умови повного завантаження клітей у безперервній групі.

У якості функції при автоматизованому проектуванні була використана інженерна математична модель процесу холодної прокатки листів і смуг [4, 10], яка викладена в лабораторній роботі 3.

Як було зазначено раніше, ця математична модель була використана в якості функції при автоматизованому проектуванні технологічних режимів обтиснень процесу холодної прокатки, яка була організована на виконання критерію повного завантаження механічного обладнання. Останнє, зокрема, знайшло своє відображення в системі прийнятих обмежень значенням величини кута захоплення $[\alpha_i] = \arctg f$, повного зусилля $[P_i]$, моменту $[M_i]$ і потужності $[N_i]$ прокатки, що допускаються:

$$\alpha_i \leq [\alpha_i]; \quad P_i \leq [P_i]; \quad M_i \leq [M_i]; \quad N_i \leq [N_i], \quad (8.1)$$

де i – порядковий номер аналізованого проходу.


Програмне забезпечення вирішення поставленого завдання оптимізації було здійснено на основі алгоритмічного методу цілеспрямованого перебору варіантів, опис якого подано формулами (3.1)...(3.12). Блок-схема використовуваного алгоритму рішення зображена на рис. 7.1.

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.
3. Набрати і налагодити програму.
4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому вихідні дані. Коефіцієнти, що характеризують механічні властивості матеріалу, що прокатується, взяти з табл. А2, наведеної в додатку А, причому порядковий номер матеріалу відповідає порядковому номеру студента в журналі викладача.
5. Записати отримані результати.
6. Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Як визначається довжина дуги контакту при холодній прокатці?
2. Назвіть критерії оптимальності при автоматизованому проектуванні режимів обтиснень процесу холодної прокатки.
3. Поясніть метод оптимізації, який був використаний при автоматизованому проектуванні технологічних режимів прокатки.

- 
4. Які параметри оптимізації можуть бути використані при автоматизованому проєктуванні процесу холодної прокатки?
 5. Поясніть процедуру пошуку максимально можливої вихідної товщини підкату.
 6. Поясніть умови зв'язку при переході від одного проходу до іншого.
 7. Поясніть, як оголошуються змінні в середовищі програмування.

Лабораторна робота 9

Автоматизоване проєктування технологічних режимів обтиснення при прокатці на реверсивних листових станах

Завдання: визначення мінімальної кількості проходів і відповідних обтиснень при прокатці листів на реверсивних станах.

Короткі теоретичні відомості

Оптимізація технологічних режимів роботи реверсивних прокатних станів і, зокрема, оптимізація технологічних режимів обтиснень при прокатці щодо широких листів і смуг на реверсивних прокатних станах полягає у визначенні мінімальної кількості проходів з умови повного завантаження устаткування [9]. Останнє можна висловити у вигляді таких умов:

$$\alpha_i \leq [\alpha_i]; \quad P_i \leq [P_i]; \quad M_i \leq [M_i]; \quad N_i \leq [N_i], \quad (9.1)$$

де i – порядковий номер аналізованого проходу.

Вирішення поставленої задачі оптимізації може бути здійснено на основі алгоритмічного методу цілеспрямованого перебору варіантів, поданого залежностями в лабораторній роботі 7. Тут також слід враховувати, що при рішенні завдання відомими є вхідна і кінцева товщина прокату, водночас, як кількість проходів невідома. Причому кількість проходів повинна бути непарною для забезпечення виходу готового прокату з вихідного боку робочої кліті.

Другим завданням при оптимізації технологічних режимів прокатки є умова забезпечення сталості одного з енергосилових параметрів по проходах. У цій лабораторній роботі в якості такого енергосилового параметра буде виступати сила прокатки. Рівність сил прокатки для кожного проходу дозволяє підвищити якість прокату, зокрема знизити поперечну різнотовщинність, а також підвищити стабільність механічних властивостей матеріалу, що прокатується. Забезпечення виконання зазначеної умови, а саме

$$P_1 = P_2 = \dots = P_n, \quad (9.2)$$

можна організувати за допомогою такої ітераційної процедури:

$$\Delta h_{ik} = \Delta h_{i(k-1)} + A_h \text{sign}\{P_{(i-1)} - P_i\}, \quad (9.3)$$

де k – номер кроку ітераційної процедури.

Тут слід зазначити, що на першому кроці ітераційної процедури в рівнянні (9.3) використовується максимальне значення абсолютного обтиснення, отримане в попередній ітераційній процедурі при визначенні мінімальної кількості проходів.

У цілому залежності (9.2), (9.3) в поєднанні з ітераційною процедурою за визначенням кількості проходів, розглянутої докладно в лабораторній роботі 7, склали повний алгоритм з оптимізації технологічних режимів при реверсивній прокатці, блок-схема якої зображена на рис. 9.1.

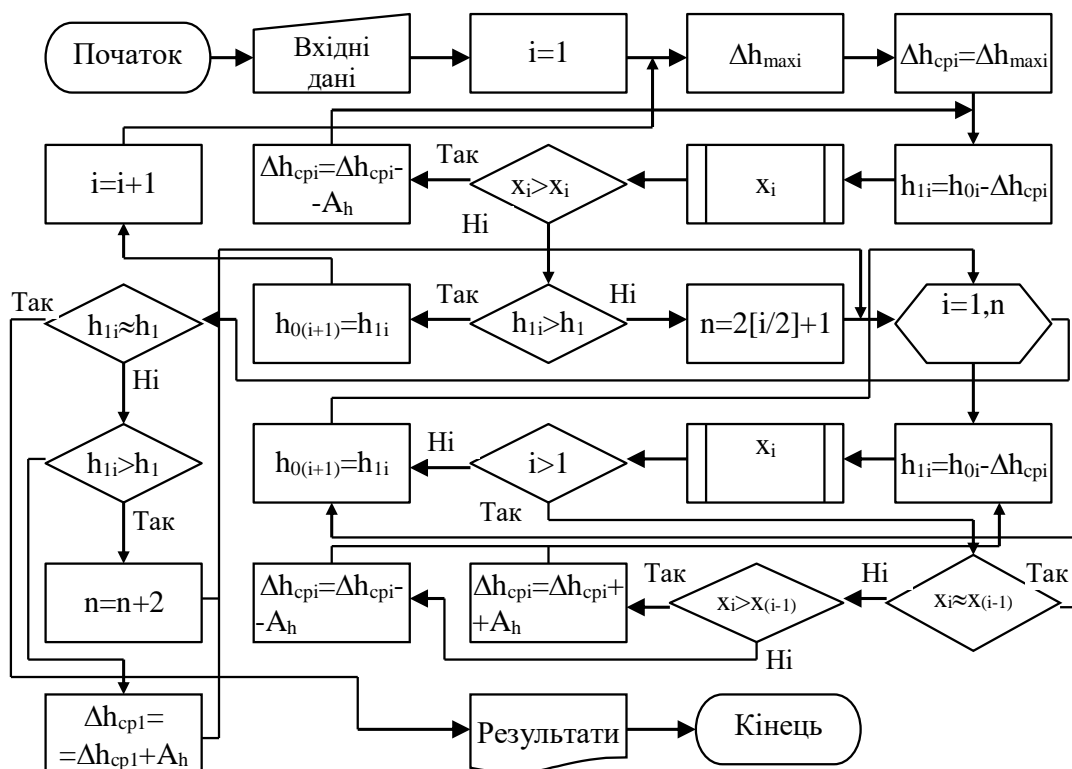


Рисунок 9.1 – Блок-схема автоматизованого розрахунку режимів обтиснень при прокатці на реверсивних станах

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.
3. Набрати і налагодити програму.
4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому вихідні дані, подані для студентів, які мають непарні варіанти, в табл. 7.1, а для студентів, які мають парні варіанти, – в табл. 8.1. Сумарне обтиснення при цьому взяти таким, що дорівнює 60 %.

5. Записати отримані результати.
6. Скласти звіт про виконану роботу

Контрольні запитання

1. Які параметри використовуються в якості критерію оптимальності режимів обтиснень процесу реверсивної прокатки?
2. Як забезпечити рівність сил прокатки в кожному проході?
3. Як визначається мінімальна кількість проходів при прокатці?
4. Що дозволяє досягти рівність енергосилових параметрів?
5. Які параметри оптимізації можуть бути використані при визначенні технологічних режимів прокатки?
6. Поясніть умови зв'язку при переході від одного проходу до іншого.

Лабораторна робота 10

Автоматизоване проєктування технологічних режимів обтиснення при сортовій прокатці

Завдання: визначення мінімальної кількості проходів і відповідних обтиснень при сортовій прокатці.

Короткі теоретичні відомості

Кінцевою метою автоматизованого проєктування технологічних режимів сортової прокатки є визначення мінімальної кількості проходів і відповідних обтиснень при заданих вихідній площі заготовки F_0 , кінцевій площі готового прокату $[F_n]$ і розподілі приватних витяжок по проходах [9]. Дане завдання вирішується на основі ітераційної процедури з визначення середньої витяжки по проходах.

Етапи використовуваної ітераційної процедури можна подати у вигляді такої алгоритмічної послідовності.

Спочатку визначається загальна витяжка:

$$\lambda_{\text{общ}} = F_0 / [F_n]. \quad (10.1)$$

Потім, знаючи табличне значення середньої витяжки $[\lambda_{\text{cp}}]$ (табл. 10.1), визначають кількість проходів:

$$n = \frac{\lg F_0 - \lg [F_n]}{\lg [\lambda_{\text{cp}}]}. \quad (10.2)$$

Після цього на основі заданого розподілу витяжок по проходах визначаються приватні витяжки та відповідні значення площі перерізу для кожного проходу.

Розподіл приватних витяжок по проходах можна задавати на основі залежностей, відображених в табл. 10.2.

Таблиця 10.1 – Значення середніх витяжок для сортових станів

Номер	Стани	Середні витяжки
1	Безперервні дротові	1,38...1,385
2	Безперервні дрібносортові	1,32...1,35
3	Середньосортові	1,30...1,35
4	Великосортові	1,28...1,32

Таблиця 10.2 – Середні значення витяжок по клітях

Профілі	Кліті		
	Груп		Чистова
	чорнових	проміжних	
Кругла і квадратна сталь	1,40...1,45	1,35...1,38	1,20...1,25
Штаба	1,40...1,45	1,25...1,35	1,15...1,23

Кінцевою процедурою при вирішенні досліджуваного завдання буде коригування або середньої витяжки, або кількості проходів на основі такої схеми:

$$\lambda_{cp} = \lambda_{cp} + A_{\lambda} \text{ при } F_n > [F_n]; \quad (10.3)$$

$$n = n + 1 \text{ при } F_n < [F_n], \quad (10.4)$$

де F_n – розрахункове значення площі поперечного перерізу прокату в останньому проході, мм²;

A_{λ} – крок збільшення середньої витяжки.

Умовою завершення описаної процедури буде рівність розрахункового значення площі поперечного перерізу в останньому проході з заданим. Розглянута процедура вирішення подана у вигляді алгоритму на рис. 10.1.

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.

2. Запустити програмну оболонку.

3. Набрати і налагодити програму.

4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому вихідні дані, подані в табл. 10.3, де порядковий номер в таблиці відповідає порядковому номеру студента в журналі викладача.

5. Записати отримані результати.

6. Скласти звіт про виконану роботу.

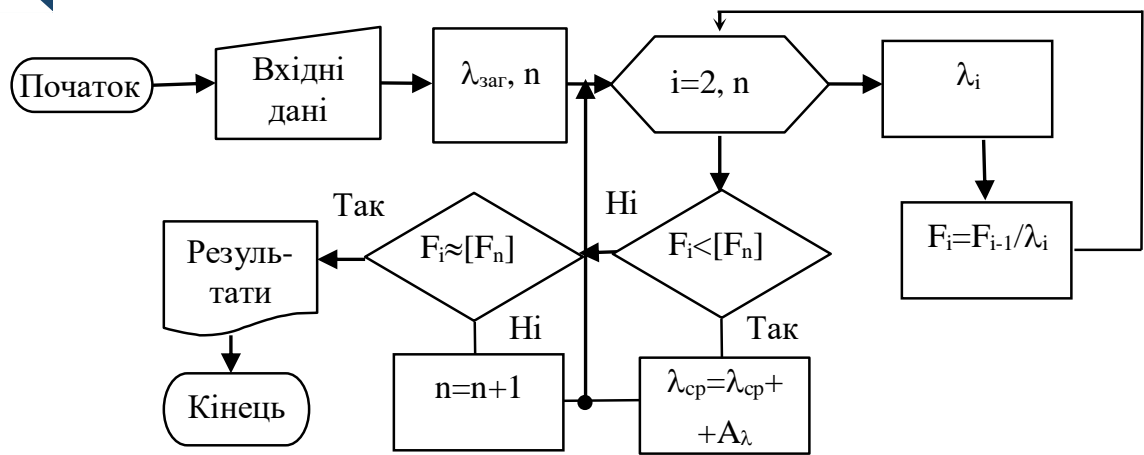


Рисунок 10.1 – Блок-схема автоматизованого розрахунку режимів обтиснень при сортовій прокатці

Таблиця 10.3 – Вихідні дані для автоматизованого розрахунку режимів обтиснень при сортовій прокатки

Тип стану	Розміри, мм		Тип стану	Розміри, мм	
	заготовки	прокату		заготовки	прокату
1 Дротовий	60×60	∅3	14 Середньо-сортний	150×150	∅70
2 –//–	60×60	∅5	15 –//–	170×170	∅70
3 –//–	60×60	∅6	16 –//–	100×100	70×7
4 –//–	60×60	∅7	17 –//–	150×150	150×20
5 –//–	60×60	∅9	18 –//–	100×100	75×5
6 –//–	60×60	∅10	19 Дрібно-сортний	170×150	∅60
7 Дрібно-сортний	60×60	∅8	20 –//–	170×150	∅100
8 –//–	80×80	∅15	21 –//–	120×120	140×10
9 –//–	80×80	∅30	22 –//–	150×150	160×10
10 –//–	60×60	20×4	23 –//–	150×150	180×10
11 –//–	80×80	40×4	24 –//–	170×150	200×10
12 –//–	80×80	70×6	25 Дротовий	60×60	∅11
13 Середньо-сортний	100×100	∅25	– –	–	–

Контрольні запитання

1. Як визначається кількість проходів при сортовій прокатці?
2. Поясніть процедуру визначення середньої витяжки по проходах.
3. Чим викликано нерівномірний розподіл часткових витяжок?
4. Назвіть варійовані параметри при автоматизованому проектуванні технологічних режимів сортової прокатки.

5. Який критерій оптимізації використовувався в цій лабораторній роботі?
6. Дайте класифікацію сортових станів.
7. Як оголошуються константи в середовищі програмування?
8. Як організувати процедуру WHILE в середовищі програмування?

Лабораторна робота 11

Автоматизоване проєктування технологічних режимів обтиснення при прокатці блюмів

Завдання: визначення мінімальної кількості проходів і відповідних обтиснень при прокатці блюмів.

Таблиця 11.1 – Вихідні дані для автоматизованого розрахунку режимів обтиснень при прокатці блюмів (ефективний радіус $R_k = 650$ мм, коефіцієнт тертя $f = 0,4$)

№ з/п	HxB, мм	hxb, мм	№ з/п	HxB, мм	hxb, мм
1	740x740	250x250	14	760x680	300x300
2	740x740	270x270	15	760x680	320x320
3	740x740	300x300	16	760x680	350x350
4	740x740	320x320	17	700x700	250x250
5	740x740	350x350	18	700x700	270x270
6	740x740	280x280	19	700x700	300x300
7	760x760	250x250	20	700x700	330x330
8	760x760	270x270	21	700x700	350x350
9	760x760	300x300	22	800x800	250x250
10	760x760	330x330	23	800x800	300x300
11	760x760	350x350	24	800x800	350x350
12	760x680	250x250	25	800x800	420x420
13	760x680	270x270			

Короткі теоретичні відомості

Основним завданням при визначенні режимів обтиснень блюмів є знаходження кількості проходів і відповідних обтиснень [3]. Це завдання вирішується за наведеною нижче послідовністю.

Максимальне обтиснення з умови забезпечення захоплення металу валками

$$\Delta h_{\max} = 0,77 f^2 R_k, \quad (11.1)$$

де f – коефіцієнт тертя при захопленні металу;

R_k – ефективний радіус валка, мм.



Сумарне обтиснення

$$\Delta h_{\Sigma} = (1 + C_{cp})[(H - h) + (B - b)], \quad (11.2)$$

де H, h – товщина злитка і блюма відповідно, мм;

B, b – ширина злитка і блюма відповідно, мм;

C_{cp} – середній показник розширення (на підставі дослідних даних $C_{cp} = 0,15$).

Беручи середнє обтиснення за прохід таким, що дорівнює максимальному обтисненню $\Delta h_{cp} = \Delta h_{max}$, кількість проходів складе:

$$n = \Delta h_{\Sigma} / \Delta h_{max}. \quad (11.3)$$

Тут слід зазначити, що кількість проходів на одноклітьовому блюмі-нгу має бути непарним для забезпечення виходу готового блюма на вихідну сторону кліті.

Важливим етапом при визначенні режимів обтиснень блюмів є визначення кількості кантувань і розподіл їх по проходах. Для спрощення цього завдання в цій лабораторній роботі приймаємо таку схему прокатки 2к2к...2к1.

Відповідно до цього кількість проходів за товщиною n_h і шириною n_b складе:

$$n_h = [n / 2] + 1; \quad n_b = n - n_h. \quad (11.4)$$

Середні обтиснення за прохід за товщиною Δh_h і шириною Δh_b складуть:

$$\Delta h_h = \frac{1,15(H - h)}{n_h}; \quad \Delta h_b = \frac{1,15(B - b)}{n_b}. \quad (11.5)$$

Залежності (11.1)...(11.5) склали повний алгоритм з автоматизованого розрахунку режимів обтиснень при прокатці блюмів. Блок-схема цього алгоритму зображена на рис. 11.1.

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.

3. Набрати і налагодити програму.
4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому вихідні дані, подані в таблиці 5.1, де порядковий номер в таблиці відповідає порядковому номеру студента в журналі викладача.
5. Записати отримані результати.
6. Скласти звіт про виконану роботу.

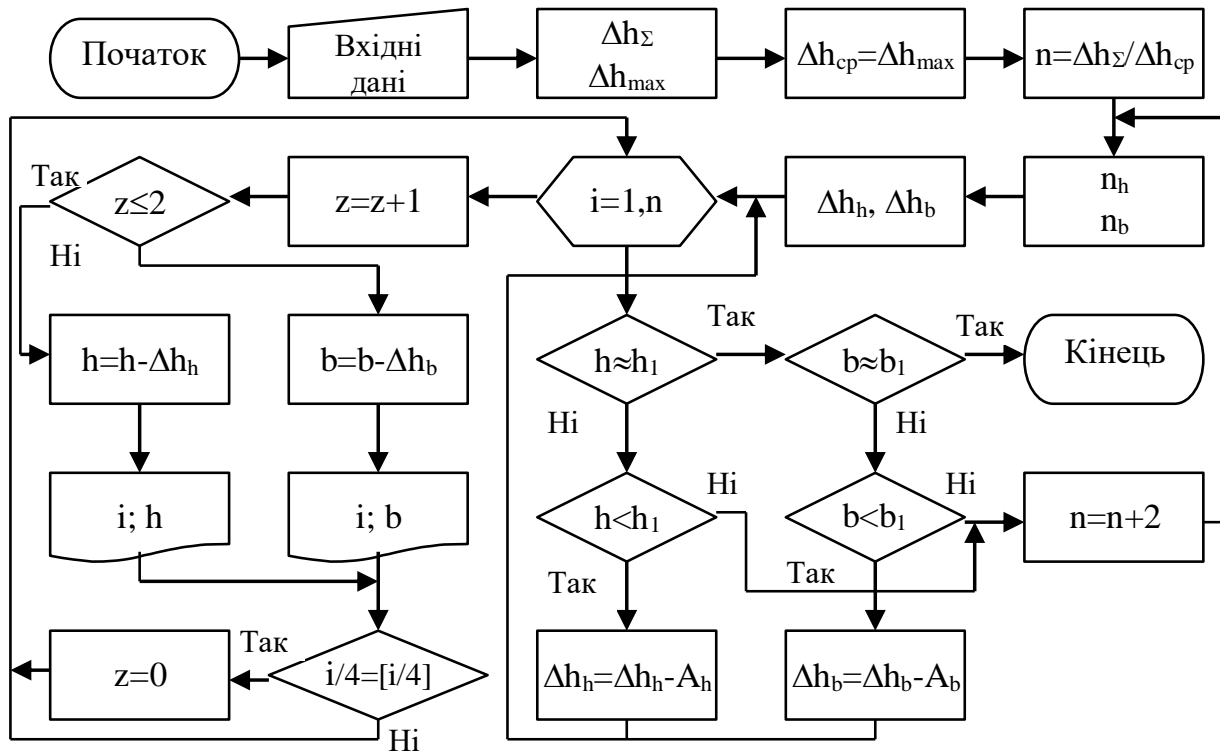


Рисунок 11.1 – Блок-схема автоматизованого розрахунку режимів обтиснень при прокатці блюмів

Контрольні запитання

1. Як визначається кількість проходів при прокатці блюмів?
2. Поясніть процедуру визначення середнього обтиснення по проходах.
3. З якої умови визначається максимальне обтиснення за прохід?
4. Назвіть варійовані параметри при автоматизованому проектуванні технологічних режимів при прокатці блюмів.
5. Який критерій оптимізації використовувався в цій лабораторній роботі?
6. Який метод оптимізації був використаний в цій лабораторній роботі?
7. Як визначається кількість кантувань при прокатці блюмів?
8. Як оголошуються масиви в середовищі програмування?
9. Як вивести результати розрахунку на екран?

Лабораторна робота 12 Автоматизоване проєктування нарізних з'єднань

Завдання: придбання практичних навичок з автоматизованого розрахунку нарізних з'єднань.

Короткі теоретичні відомості

Розрізняють два типи компоновання болтових з'єднань: з зазором і без зазору. Унаслідок цього є і відмінності в розрахунку напружень. За наявності зазору в болтовому з'єднанні (рис. 12.1) сумарна осьова сила буде дорівнювати:

$$Y = Q + T / f, \quad (12.1)$$

де Q, T – зовнішні навантаження, Н;

f – коефіцієнт тертя між деталями, які сполучаються.

Напруження розтягування в цьому випадку визначається як

$$\sigma = 4Y / (\pi d_e^2), \quad (12.2)$$

де d_B – внутрішній діаметр різі, мм.

Умова міцності для компоновання нарізного сполучення такого типу

$$\sigma < [\sigma], \quad (12.3)$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження матеріалу, Н/мм².

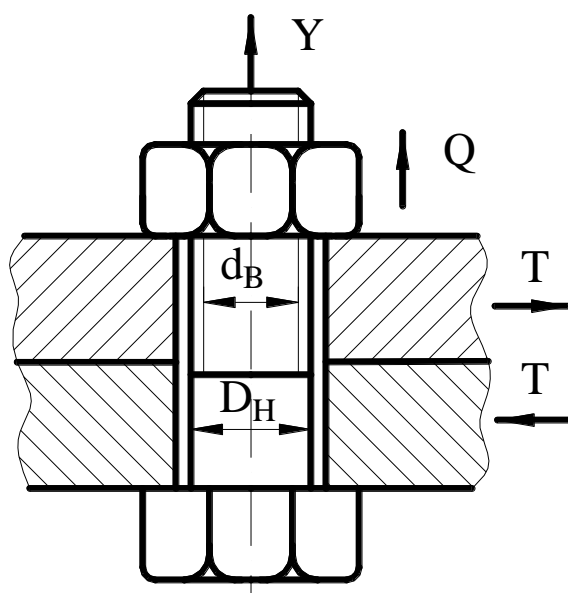


Рисунок 12.1 – Розрахункова схема нарізного сполучення



При компонованні без зазору в болтовому з'єднанні будуть виникати напруження розтягнення і зрізу. Напруження розтягнення будуть дорівнювати:

$$\sigma = 4Q / (\pi d_e^2), \quad (12.4)$$

напруження зрізу:

$$\tau = 4T / (\pi d_e^2), \quad (12.5)$$

а еквівалентні напруження в цьому випадку визначаються за IV теорією міцності:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}. \quad (12.6)$$

Умова міцності

$$\sigma_{\text{екв}} \leq [\sigma]. \quad (12.7)$$

Власне автоматизоване проектування нарізних з'єднань полягає в переборі з бази даних усіх типорозмірів різей (додаток Б) з найменшого і перевірки їх на виконання умови міцності (12.3) або (12.7). Укрупнена блок-схема алгоритму рішення цього завдання подана на рис. 12.2.

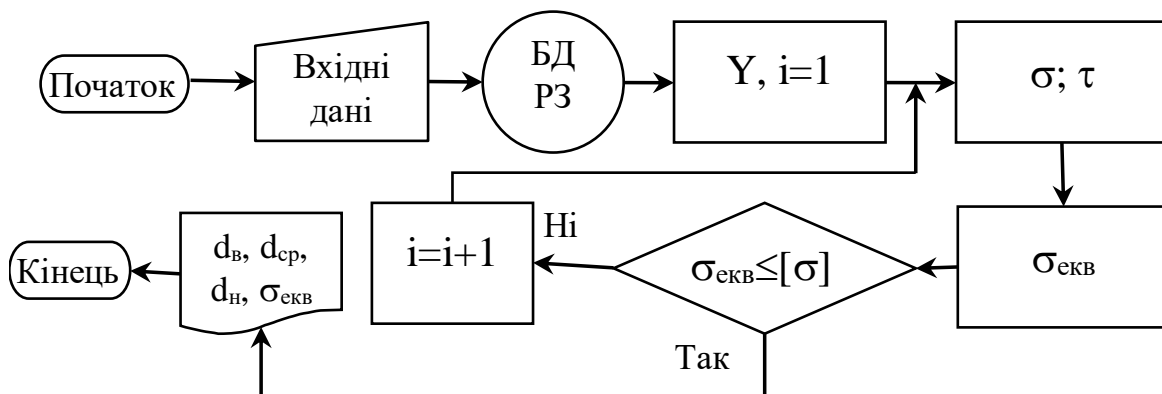


Рисунок 12.2 – Блок-схема автоматизованого проектування нарізних з'єднань

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.

3. Набрати і налагодити програму з автоматизованого проектування нарізних з'єднань.

4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому такі вихідні дані: $Q = 250 \text{ N}$, kH ; $T = 0.25 Q$; $f = 0.4$; $[\sigma] = 450 \text{ Н/мм}^2$, де N – порядковий номер студента в журналі викладача.

5. Записати отримані результати.

6. Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. У чому особливості розрахунку при різних компоновках болтового з'єднання?

2. Який закон тертя використовується при визначенні вертикальної реакції від сили тертя деталей, що сполучаються?

3. Поясніть схему послідовного перебору варіантів, яка використана в програмі.

4. Чим визначаються допустимі напруження матеріалу болта?

5. У якому місці болтового з'єднання знаходиться небезпечний переріз?

Лабораторна робота 13

Автоматизоване проектування валів і осей приводів прокатних станів

Завдання: придбання практичних навичок з автоматизованого проектування валів і осей приводів прокатних станів.

Короткі теоретичні відомості

У загальному випадку вал приводу прокатного стану є валом, на якому встановлені два косозубих зубчастих колеса (рис. 13.1). Сили, які діють на перше зубчасте колесо (I), дорівнюватимуть:

$$P_{окр1} = 2M / D_1; \quad P_{r1} = P_{окр1} \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta; \quad P_{ос1} = P_{окр1} \operatorname{tg} \beta, \quad (13.1)$$

де $\alpha = 20^\circ$ – кут нахилу твірної;

$\beta = 12^\circ$ – кут нахилу зуба;

$P_{окр}$, P_{r1} , $P_{ос1}$ – колова, радіальна і осьова складові сили, що діє в зубчастому зачепленні, Н;

M – момент, який передається зубчатим зачепленням, Н·мм;

D_1 – дільний діаметр першого зубчастого колеса, мм.

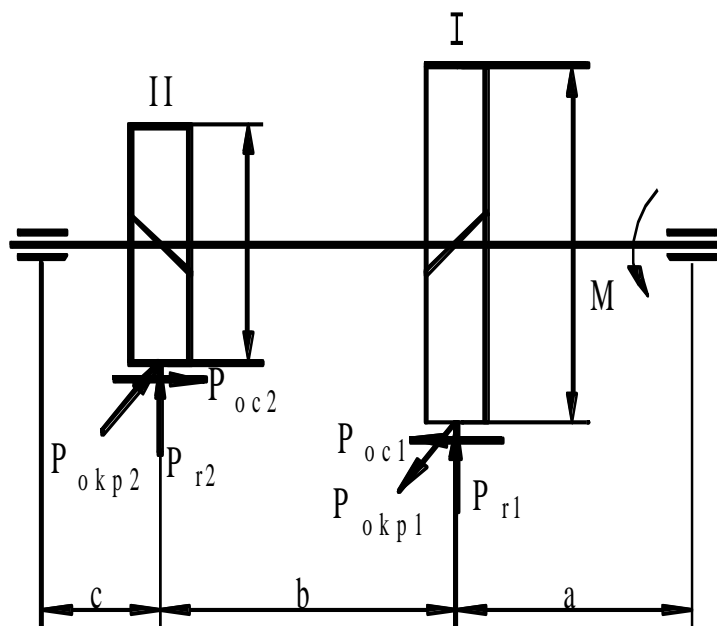


Рисунок 13.1 – Розрахункова схема для автоматизованого проектування валів і осей

Для другого зубчастого колеса (II):

$$P_{окр2} = 2M / d_2; \quad P_{r2} = P_{окр2} \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta; \quad P_{ос2} = P_{окр2} \operatorname{tg} \beta, \quad (13.2)$$

де d_2 – дільний діаметр другого зубчастого колеса, мм.

Реакції в лівій і правій опорах, відповідно, в горизонтальній площині дорівнюватимуть:

$$R_{cx} = \frac{P_{окр1} a - P_{окк2} (a + b)}{a + b + c}; \quad R_{ax} = \frac{P_{окр1} (b + c) - P_{окк2} c}{a + b + c}, \quad (13.3)$$

де a , b , c – відстані від лівої опори до першого зубчастого колеса, від першого до другого зубчастого колеса і від другого зубчастого колеса до лівої опори (див. рис. 13.1), відповідно, мм.

Згинальні моменти в горизонтальній площині на першому і другому зубчастому колесі складуть:

$$M_{xI} = R_{ax} a; \quad M_{xII} = R_{cx} c. \quad (13.4)$$

Аналогічно визначаються згинальні моменти у вертикальній площині.

Реакції в опорах:



$$R_{ay} = \frac{P_{r1}(b+c) - P_{oc1}D_1/2 + P_{r2}c + P_{oc2}d_2/2}{a+b+c};$$

$$R_{cy} = \frac{P_{r1}a + P_{oc1}D_1/2 + P_{r2}(a+b) - P_{oc2}d_2/2}{a+b+c}. \quad (13.5)$$

Згинальні моменти у вертикальній площині:

$$M_{yl} = R_{ay}a; \quad M_{yII} = R_{cy}c. \quad (13.6)$$

Сумарні моменти в перерізах під зубчастими колесами:

$$M_{изл} = \sqrt{M_{xl}^2 + M_{yl}^2}; \quad M_{излII} = \sqrt{M_{xII}^2 + M_{yII}^2}. \quad (13.7)$$

Максимальний згинальний момент M_{\max} визначається шляхом порівняння $M_{изл}$ з $M_{излII}$ і прирівнюється до більшого з них. Напруження, що виникають у валі приводу, будуть визначатися за такими залежностями:

$$\sigma_{изг} = \frac{M_{\max}}{0.1d_e^3}; \quad \sigma_{сж} = \frac{4P_{oc}}{\pi d_e^2}; \quad \tau = \frac{M_{\max}}{0.2d_e^3}, \quad (13.8)$$

де $\sigma_{изг}, \sigma_{сж}, \tau$ – напруження згину, стиснення-розтягування і кручення, відповідно, Н/мм².

І, нарешті, умова міцності, якої повинен задовольняти вал, набуде вигляду

$$\sigma_{экв} = \sqrt{(\sigma_{изг} + \sigma_{сж})^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma]. \quad (13.9)$$

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.
3. Набрати і налагодити програму з автоматизованого проектування валів і осей приводів прокатних станів.
4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому такі вихідні дані: $M = (5 + 5n) \cdot 10^6$, Нмм; $d_2 = 300$ мм; $D_1 = 500$ мм; $a = 500 + 10n$, мм; $b = a/2$; $c = 0.8a$; $[\sigma] = 360$ Н/мм², де n – порядковий номер студента в журналі викладача.
5. Записати отримані результати.
6. Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Які сили діють у зубчастому зачепленні, як їх визначити?
2. Яким чином визначається сумарний згинальний момент?
3. Поясніть процедуру знаходження оптимального діаметра вала.
4. Дайте визначення умови міцності.
5. Якими факторами регламентується коефіцієнт запасу міцності деталі?

Лабораторна робота 14 Автоматизований розрахунок і проєктування валкових вузлів типу «ДУО»

Завдання: придбання практичних навичок з автоматизованого розрахунку і проєктування двовалкового вузла прокатних станів.

Таблиця 14.1 – Вихідні дані для проєктування робочих валків

Параметр	Позначення, од. вим.	Значення
Кінцева товщина	$h_{1\min}$, мм	1+0.1n
Відносне обтиснення	ε	0.30
Ширина штаби	b, мм	400
Відстань між опорами	L, мм	800
Коефіцієнт тертя при захопленні	f_3	0.12
Натяжіння	відсутнє	
Механічні властивості матеріалу, що прокатується	a_0 , Н/мм ²	397.9
	a_1 , Н/мм ²	1913.9
	a_2 , Н/мм ²	-2165.4
	a_3 , Н/мм ²	1057.8
Межа міцності матеріалу валка	σ_B , Н/мм ²	900
Коефіцієнт концентрації напружень	$K_{\sigma D}$	5.1

Короткі теоретичні відомості

Робочі і опорні валки є основним деформуючим інструментом при реалізації процесів прокатки [11]. Тому вибір оптимальних геометричних параметрів і компонування валкового вузла є найважливішим етапом при проєктуванні як прокатних станів, так і технологічних режимів. Основним параметром прокатних валків є їх діаметр. Його вибір здійснюється за умови захоплення з точки зору нижньої оцінки і умови викатуваності з точки зору верхньої оцінки. З умови викатуваності максимальне значення діаметра робочого валка дорівнюватиме [11]:

$$D_{p.в. max} = \frac{h_{1 min}}{1.54 C(2K_c - \sigma_{cp})f}, \quad (14.1)$$

де $h_{1 min}$ – мінімальне значення товщини матеріалу, що прокатується (береться з паспортних характеристик стану), мм;

$C = 8 \frac{1 - \nu_s^2}{\pi E_s}$ – пружна постійна матеріалу робочих валків, $\text{мм}^2 / \text{Н}$;

$2K_c$ – подвоєний коефіцієнт опору зрушенню матеріалу, що прокатується, $\text{Н} / \text{мм}^2$;

σ_{cp} – середнє значення напружень переднього і заднього натягіння, $\text{Н} / \text{мм}^2$;

f – коефіцієнт тертя при прокатці;

ν_s – коефіцієнт Пуассона для матеріалу робочого валка (для сталі $\nu_s = 0.3$);

E_s – модуль пружності для матеріалу робочого валка (для сталі $E_s = 2.1 \cdot 10^5 \text{ Н} / \text{мм}^2$).

Мінімальний діаметр робочого валка визначається з умови захоплення металу валками:

$$\text{tg } \alpha_0 \leq f_3, \quad (14.2)$$

де α_0 – кут захоплення металу валками, який визначається як

$$\alpha_0 = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{D_{p.в. min}} \right), \quad (14.3)$$

де f_3 – коефіцієнт тертя при захопленні металу валками;

Δh – абсолютна обтиснення, мм;

$D_{p.в. min}$ – мінімальне значення діаметра робочого валка, мм.

При проектуванні діаметра робочих валків, крім умови викатуваності та умови захоплення при схемі «дуо», робочий валок повинен також задовольняти умовам статичної і циклічної міцності (дані умови розглянуті в курсі «Механічне обладнання металургійних заводів»). Блок-схема автоматизованого проектування робочих валків схеми «дуо» зображена на рис. 14.1.

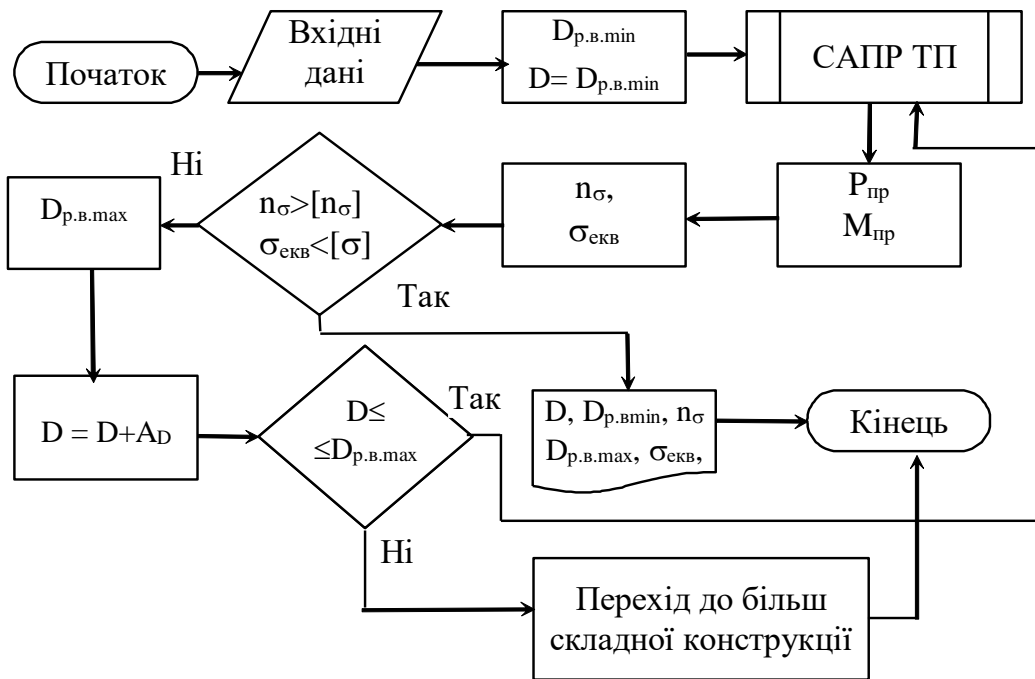



Рисунок 14.1 – Блок-схема автоматизованого проєктування двовалкових вузлів прокатного стану

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.
3. Набрати і налагодити програму з автоматизованого проєктування двовалкового вузла прокатного стану.
4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому вихідні дані.
5. Записати отримані результати.
6. Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Якими критеріями задається максимальне і мінімальне значення радіуса робочого валка?
2. Які напруження діють у робочому валку при прокатці? Як їх визначити?
3. Як визначаються еквівалентні напруження в робочому валку?
4. Яким чином здійснюється розрахунок робочих валків на циклічну міцність?
5. Як визначається модуль пружності вузла робочих валків?
6. Яким чином враховується пружна деформація робочої кліти в умові захоплення металу валками?
7. Які заходи передбачені при проєктуванні вузла робочих валків, якщо не виконується ні умова викатуваності, ні умова захоплення?



Лабораторна робота 15

Автоматизований розрахунок і проєктування валкових вузлів типу «КВАРТО»

Завдання: придбання практичних навичок з автоматизованого розрахунку і проєктування чотиривалкових вузлів прокатних станів.

Короткі теоретичні відомості

Основними конструктивними параметрами валкових вузлів прокатних станів є їх компонування, діаметри робочих і опорних валків d_p і D_{on} , їх довжина L_b , шорсткість поверхні та профілювання. Важливими в цьому випадку є показники точності виготовлення і монтажу елементів валкового вузла. Враховуючи вибір діаметрів опорних валків при використанні чотиривалкового компонування, що отримало найбільше поширення як на станах гарячої, так і на станах холодної прокатки, необхідно зазначити, що основним критерієм у цьому випадку, відповідно до рекомендацій робіт [9, 11], є забезпечення рівномірних розподілів міжвалкового погонного навантаження q_m . З точки зору техніко-економічних показників проєктованого обладнання виконання зазначеної вище умови відповідає досягненню мінімального рівня контактних напружень, покращує умови регулювання профілю та форми смуги, що прокатується, а також сприяє підвищенню стійкості робочих і опорних валків. Кількісно алгоритм визначення поточного значення, що передбачає можливість наявності протизгину робочих валків силами, можна подати у вигляді сукупності аналітичних описів, отриманих В. П. Полухінім на основі узагальнення широкого спектра результатів теоретичних і експериментальних досліджень [9, 11]:

$$q_m(x) = a_0 + 4a_2(x - L_B/2)^2 / L_B^2; \quad (15.1)$$

$$a_0 = [(8252 - 34\alpha)q_{m,cp} - 1344B_0\alpha] / (13440 + 29\alpha); \quad (15.2)$$

$$a_2 = 3(q_{m,cp} - a_0); \quad q_{m,cp} = (P + 2Q_{II})/L; \quad q_{II} = P/b; \quad (15.3)$$

$$B_{on} = \frac{q_{II}}{120}(\beta_K^5 - \beta_H^5) - \frac{q_{II}}{96}(\beta_K - \beta_H) - \frac{q_{II}}{24}(0.5 - \beta_H)^4 + \frac{Q_{II}a_Q}{48L_P^2}; \quad (15.4)$$

$$\beta_H = l_H/L_{on}; \quad \beta_K = l_K/L_P; \quad (15.5)$$

$$\alpha = \frac{1 - \nu_p^2}{1 - \nu_{оп}^2} \frac{E_{оп}}{E_p} \left[\left(3260 \frac{L_p}{D_{оп}} - 38.5 \right) \left(\frac{d_p}{D_{оп}} \right)^2 - \left(5330 \frac{L_p}{D_{оп}} - 127 \right) \left(\frac{d_p}{D_{оп}} \right) + \left(2300 \frac{L_p}{D_{оп}} - 183 \right) \right], \quad (15.6)$$

де ν_p , E_p , $\nu_{оп}$, $E_{оп}$ – коефіцієнти Пуассона і модулі пружності матеріалів робочих і опорних валків, відповідно (для сталі $\nu = 0.3$; $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ H/мм}^2$);

l_H , L_p , a_Q , L_B , L , l_K , b , β_K , β_H , $L_{оп}$ – конструктивні параметри валкової системи (рис. 15.1);

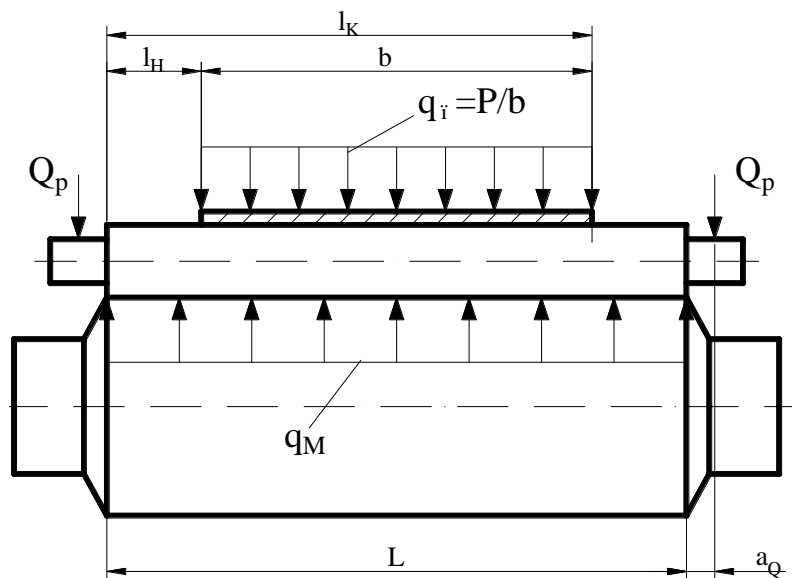


Рисунок 15.1 – Розрахункова схема валкової системи «кварто»

Слід зазначити, що структура залежностей (15.1)...(15.6) дозволяє безпосередньо визначити співвідношення діаметрів робочих і опорних валків $d_p/D_{оп}$, що забезпечує умови сталості міжвалкових погонних навантажень, тобто така умова: $q_m(x) = const$. У цьому випадку, відповідно до формул (15.1) і (15.3) і з урахуванням чого з виразу (15.2) впливає:

$$\alpha \Big|_{q_m(x)=const} = - \frac{5188(1 + 2Z_Q)}{63(1 + 2Z_Q) + 13440L_p B_{он} / (b q_n)}, \quad (15.7)$$

де $Z_Q = Q_n/P$ – відносний показник сили протизгину;
 $B_{он}$ – ширина.

Підставивши вираз (15.7) в умову (15.6) і вирішивши отримане квадратне рівняння щодо співвідношення діаметрів робочих і опорних валків, що забезпечує сталість погонного міжвалкового навантаження $q_{м.сп}(x)$, отримаємо [4]:

$$d_p / D_{on} |_{q_{м}(x)=const} = (Z_1 - \sqrt{Z_1^2 - 4Z_2Z_3}) / (2Z_2), \quad (15.8)$$

де показники Z_1, Z_2, Z_3 , використовувані для спрощення форми запису, визначаються як:

$$Z_1 = 5330L_p / D_{on} - 127; \quad Z_2 = 3260L_p / D_{on} - 38.5;$$

$$Z_3 = 2300 \frac{L_p}{D_{on}} - 183 - \frac{(1 - \nu_{on}^2) E_p}{(1 - \nu_p^2) E_{on}} \frac{5188(1 + 2Z_Q)}{[63(1 + 2Z_Q) + 13440Z_4L_p/b]};$$

$$Z_4 = \frac{B_{on}}{q_n} = \frac{1}{120} (\beta_k^5 - \beta_n^5) - \frac{1}{96} (\beta_k - \beta_n) - \frac{1}{24} (0.5 - \beta_n)^4 + \frac{Z_Q b a_Q}{48L_p^2}.$$

Укрупнена блок-схема алгоритму автоматизованого проєктування діаметра бочки опорного валка схеми «кварто» зображена на рис. 15.2.

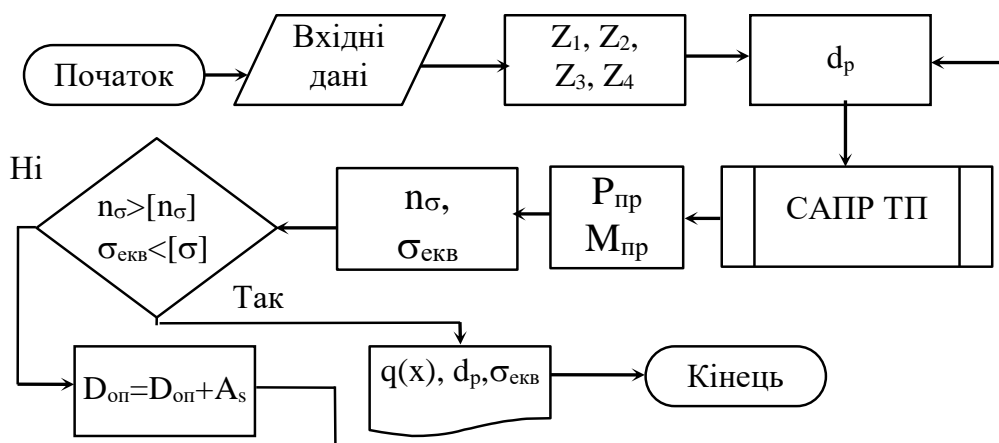



Рисунок 15.2 – Укрупнена блок-схема алгоритму автоматизованого проєктування опорних валків системи «кварто»

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.
3. Набрати і налагодити програму з автоматизованого проєктування опорних валків системи «кварто».
4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому такі вихідні дані: $D_{on} = 250 + 10n$, мм; $L_p = L_{on} = 300 + 10n$, мм; $b = 0.8L_p$, мм; $Q_n = 0.2P$;



$a_Q = L_p / 5$, $l_n = 0.1 \cdot L_p$, $l_k = 0.9 \cdot L_p$ де n – порядковий номер студента в журналі викладача. Відсутні вихідні дані взяти з табл. 7.1.

5. Записати отримані результати.

6. Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Назвіть основний критерій, який визначає оптимальне співвідношення діаметрів робочих і опорних валків.

2. На які напруження розраховуються робочий і опорний валки при схемі «кварто»?

3. Опишіть процедуру знаходження оптимального співвідношення діаметрів робочих і опорних валків.

4. Назвіть усі умови, які регламентують геометричні параметри опорного валка.

Лабораторна робота 16

Автоматизоване проєктування натискних механізмів електро-механічного типу

Завдання: придбання практичних навичок з автоматизованого розрахунку і проєктування електромеханічних натискних механізмів.

Короткі теоретичні відомості

Основними конструктивними елементами електромеханічного натискного пристрою є натискний гвинт і гайка. Натискний гвинт розраховується на стиск і кручення нижньої його частини [11]. Напруження стиску при цьому дорівнюють

$$\sigma_{сж} = 4Y / (\pi d_{г.гн}^2), \quad (16.1)$$

де Y – осьова сила, що діє на гвинт (при розрахунку на міцність осьова сила дорівнює силі прокатці), Н;

$d_{г.гн} = D_n - 1,73 \cdot S$ – внутрішній діаметр різі натискного гвинта, мм.

У нижній частині натискного гвинта буде діяти момент, який дорівнює

$$M_n = Y(d_n / 3) \mu_n, \quad (16.2)$$

де $d_{п} = 1.2d_B$ – діаметр підп'ятника, мм;

$\mu_{п}$ – коефіцієнт тертя у підп'ятнику.

Цей момент буде викликати напруження кручення:

$$\tau = M_n / (0.2 d_{в. вн}^3). \quad (16.3)$$

Виходячи з викладеного вище, натискний гвинт повинен задовольняти такій умови міцності:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{сж}^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma], \quad (16.4)$$

де $[\sigma]$ – допустима межа міцності (зазвичай приймають для високоуглецевої і легованої сталей $[\sigma] = 100 \dots 150 \text{ Н/мм}^2$).

Гайку натискного механізму розраховують на стиск, на зріз і змінання різі, а також на кручення.

Напруження змінання в різі

$$\sigma_{см} = \frac{4YS}{\pi(D_n^2 - d_{вн}^2) H_g} \leq [\sigma_{см}], \quad (16.5)$$

де S – крок різі, мм;

$D_n, d_{вн}$ – зовнішній і внутрішній діаметр різі, відповідно, мм;

$H_g = D_n + 10n$ – висота гайки, мм;

$[\sigma_{см}] = 40 \text{ Н/мм}^2$ – допустимі напруження змінання.

Напруження зрізу в різі

$$\tau_{ср} = \frac{YS}{\pi d_{вн}^2 H_g t} \leq [\tau_{ср}], \quad (16.6)$$


де t – коефіцієнт заповнення профілю (для трапецеїдальної різі – $t = 0.75S$, для упорної – $t = 0.65 \dots 0.68S$);

$[\tau_{ср}]$ – допустиме напруження зрізу (зазвичай приймають $[\tau_{ср}] = 10 \dots 20 \text{ Н/мм}^2$).

Напруження стиску в гайці

$$\sigma_{сж}^g = \frac{4Y}{\pi(D_g^2 - D_n^2)} \leq [\sigma_{сж}^g], \quad (16.7)$$

де $D_g = D_n + x$ – зовнішній діаметр гайки, мм;



x – параметр для варіювання діаметру гайки, обирається конструктивно;

$[\sigma_{сж}] = 30 \dots 40 \text{ Н/мм}^2$ – допустимі напруження стиснення.

Момент в гвинтовій парі

$$M_{en} = Y \frac{d_p}{2} \operatorname{tg}(\alpha + \rho), \quad (16.8)$$

де d_{cp} – середній діаметр різі, мм;

Y – осьова сила, що діє на гвинт (у цьому випадку: при налаштуванні з металом у валках осьова сила дорівнює половині сили прокатки, а при настройці без металу у валках – половині сили переверівноваження валків), Н;

α – кут нахилу витка різі, $\alpha = \operatorname{arctg}(S/(\pi d_{cp}))$;

ρ – кут тертя в різі, $\rho = \operatorname{arctg} \mu$;

μ – коефіцієнт тертя в різі, $\mu = 0.1$ при рясному змащуванні і $\mu = 0.3$ при закладному мастилі.

Момент на хвостовику натискного гвинта

$$M_{xs} = M_{en} + M_n. \quad (16.9)$$

Потужність, яка необхідна для обертання натискного гвинта,

$$N = 2\pi VM_{xs} / S, \quad (16.10)$$

де V – швидкість переміщення натискного гвинта, мм / с.

Автоматизоване проектування натискного механізму електромеханічного типу здійснюється за такою схемою: вибір діаметра гвинта з умови міцності на стиск і кручення; вибір висоти гайки з умови міцності на зминання і зріз нарізного сполучення; вибір зовнішнього діаметра гайки з умови міцності на стиск; вибір електродвигуна з необхідної потужності приводу.

Блок-схема алгоритму описаної процедури зображена на рис. 16.1.

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.
3. Набрати і налагодити програму з автоматизованого проектування

електромеханічних натискних пристроїв.

4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому такі вихідні дані: $Y = 1000 + 500n$, кН; $V = 0.1 + 0.1n$ $\mu = 0.15$; де n – порядковий номер студента в журналі викладача. Невистачаючі дані зазначені в додатку В.

5. Записати отримані результати.

6. Скласти звіт про виконану роботу.

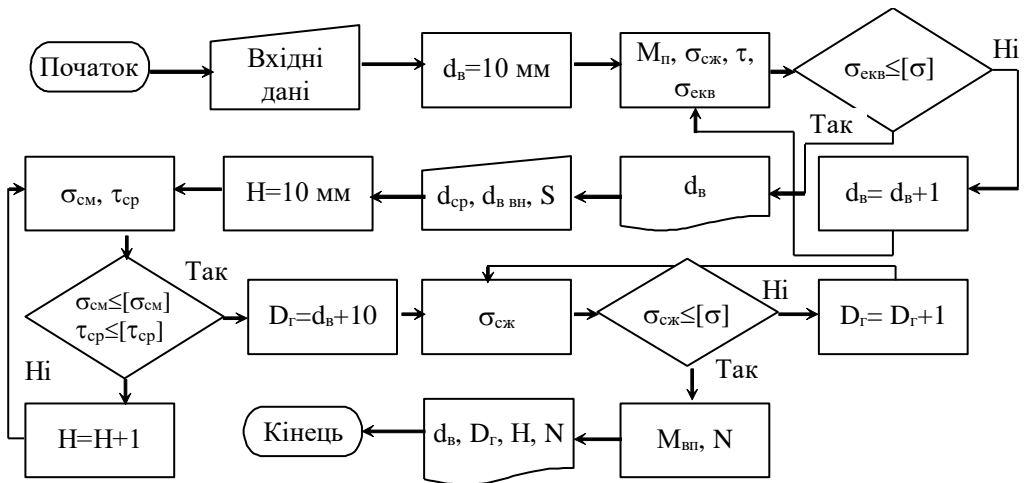


Рисунок 16.1 – Блок-схема алгоритму автоматизованого проектування електромеханічних натискних пристроїв

Контрольні запитання

1. На які напруження розраховується гвинт натискного механізму?
2. Як визначається необхідна висота гайки натискного механізму?
3. Як визначається зовнішній діаметр гайки натискного механізму?
4. Як визначається необхідна потужність приводу натискного механізму?
5. З яких матеріалів виготовляються натискні гвинт і гайка?

Лабораторна робота 17

Автоматизоване проектування гідравлічних натискних механізмів

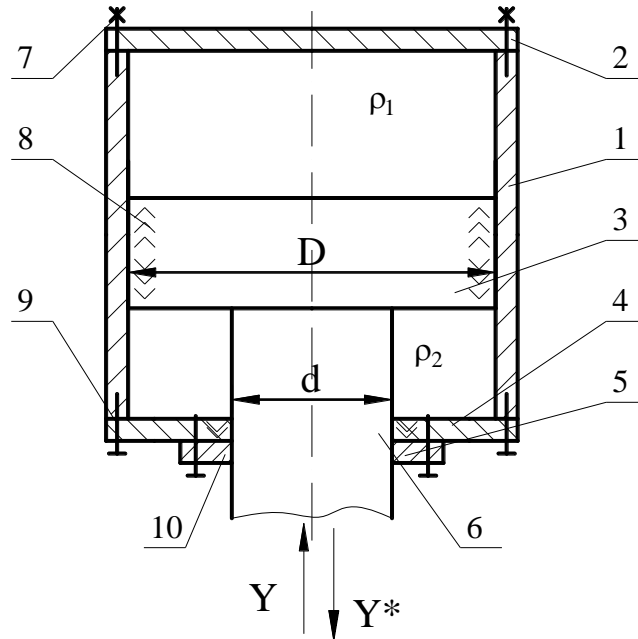
Завдання: придбання практичних навичок з автоматизованого розрахунку і проектування гідравлічних натискних механізмів.

Короткі теоретичні відомості

Існує кілька типів гідравлічних натискних механізмів: поршневі (двосторонньої дії), плунжерні (односторонньої дії) і сильфонні. У цій лабораторній роботі буде розглянуто автоматизоване проектування плунжерних гідравлічних пристроїв [11]. Основними конструктивними елементами гідравлічних натискних механізмів є шток, поршень, система ущільнень і ко-

рпус (рис. 17.1). При автоматизованому проектуванні гідравлічних натискних механізмів використовується таке інформаційне забезпечення:

- геометричні характеристики поршневих і штокової ущільнень (дод. Г);
- тиск робочої рідини ρ_1 і ρ_2 ;
- геометричні характеристики нарізних з'єднань;
- конструктивне виконання механізму.



- 1 – корпус; 2 – задня кришка; 3 – поршень; 4 – передня кришка;
 5 – кришка штокових ущільнень; 6 – штокові ущільнення;
 7 – болти кріплення задньої кришки; 8 – поршневе ущільнення;
 9 – болтове кріплення передньої кришки; 10 – болтове кріплення кришки штокового ущільнення

Рисунок 17.1 – Розрахункова схема гідравлічного натискного механізму

Автоматизований розрахунок гідравлічного механізму полягає у визначенні діаметра штока з умови міцності на стиск; визначенні діаметра поршня з умови подолання сили прокатки; визначенні типорозмірів болтових з'єднань з умов міцності та розрахунку товщини стінки.

Діаметр штока визначається з умови міцності

$$\sigma_{сж}^{шт} = \frac{4Y}{\pi d^2} \leq [\sigma_{сж}], \quad (17.1)$$

де Y – зусилля, що діє на шток, Н;
 d – діаметр штока, мм.



Діаметр поршня визначається з умов подолання діючих навантажень:

$$F_1 = \rho_1 \pi D^2 / 4 \geq Y; \quad F_2 = \rho_2 \pi (D^2 - d^2) / 4 > Y^*, \quad (17.2)$$

де Y^* – вага верхнього опорного валка, Н;
 D – діаметр поршня, мм.

Автоматизований вибір типорозмірів нарізних з'єднань здійснюється аналогічно методиці, викладеній в лабораторній роботі 8. Причому сили, що діють на відповідні болтові з'єднання (див. рис. 17.1), дорівнюватимуть

$$F_7 = \rho_1 \frac{\pi D^2}{4n_7}; \quad F_9 = \rho_2 \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4n_9}; \quad F_{10} = \rho_2 \frac{\pi (d_{\text{ушл}}^2 - d^2)}{4n_{10}} \quad (17.3)$$

де n_7, n_9, n_{10} – кількість болтів кріплення відповідної кришки;
 $d_{\text{ушл}}$ – діаметр ущільнення передньої кришки, мм.

Діаметр стінки гідроциліндра визначається з такої умови міцності:

$$\sigma_{\theta} = \frac{2K^2}{1-K^2} \rho_1 \leq [\sigma], \quad (17.4)$$

де $K = D / (D + 2t) = D / D_n$ – коефіцієнт, що враховує співвідношення внутрішнього діаметра стінки до зовнішнього;
 t – товщина стінки, мм.

У цілому, залежно (17.1)...(17.4) складають повний алгоритм автоматизованого проектування гідравлічних натискних пристроїв, блок-схема якого подана на рис. 17.2.

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.
3. Набрати і налагодити програму з автоматизованого проектування гідравлічних натискних пристроїв.
4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому такі вихідні дані: $Y = 1000 \cdot n$, кН; $Y^* = Y / 100$; $\rho_1 = 20$ МПа; $\rho_2 = 5$ МПа; $[\sigma] = 120$ Н/мм², де n – порядковий номер студента в журналі викладача.
5. Записати отримані результати.
6. Скласти звіт про виконану роботу.

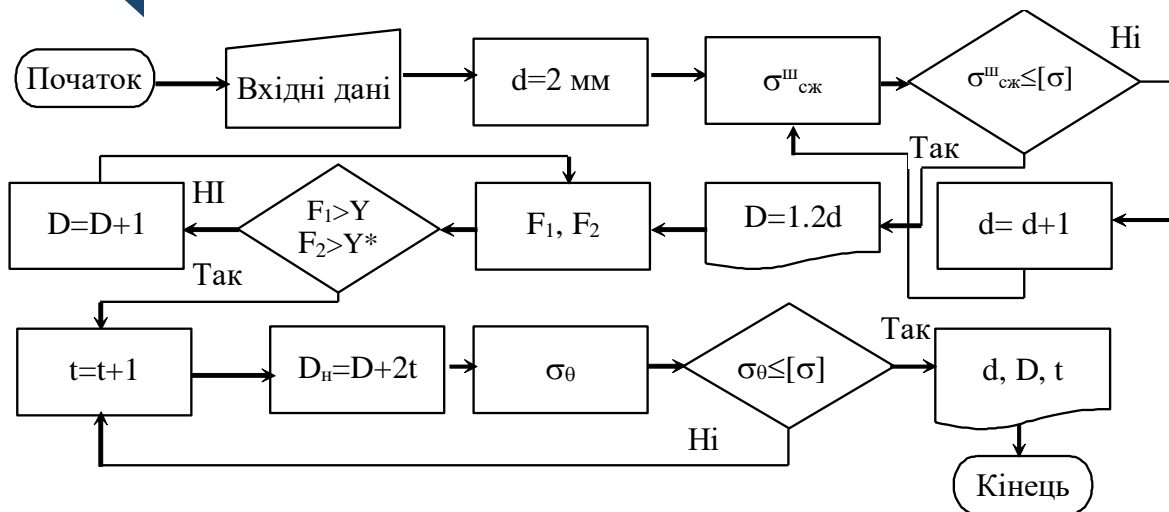


Рисунок 17.2 – Блок-схема алгоритму автоматизованого проектування гідравлічних натискних пристроїв

Контрольні запитання

1. Назвіть основні типи гідравлічних натискних пристроїв.
2. З якої умови визначається діаметр штока гідравлічного натискного пристрою?
3. Яким чином визначити оптимальне значення стінки гідроциліндра?
4. Як визначити витрату рідини в гідроциліндрі?

Лабораторна робота 18 Автоматизоване проектування вузла станин з умови рівномірності

Завдання: придбання практичних навичок з автоматизованого розрахунку і проектування вузла станин.

Короткі теоретичні відомості

Станина є основним конструкційним елементом робочої кліти, що сприймає силу прокатки. Для розрахунків станини закритого типу застосовують спрощену розрахункову схему у вигляді замкнутої прямокутної рами, розміри якої збігаються з розмірами нейтральної лінії стійок і поперечок (рис. 18.1), яка навантажена вертикальною силою Y [11]. Розміри і перерізи верхньої і нижньої поперечок беруть однаковими.

Така система статично невизначена, тому її замінюють статично визначною еквівалентною системою шляхом врізання шарнірів у вузлах рами і враховуючи взаємодію стійок і поперечок статично невизначеними моментами M_0 . Їхню величину визначають за допомогою прийомів рішення статично невизначених рам з курсу опору матеріалів. У загальному випадку формула для статично невизначеного моменту M_0 має вигляд:



$$M_o = \frac{YL_1}{4} \frac{1}{2 \left(1 + \frac{L_2}{L_1} \frac{I_1}{I_2} \right)}, \quad (18.1)$$

де L_1, L_2 – довжина верхньої і нижньої поперечок за нейтральною лінією;

I_1, I_2 – моменти інерції перерізів поперечки та стійки.

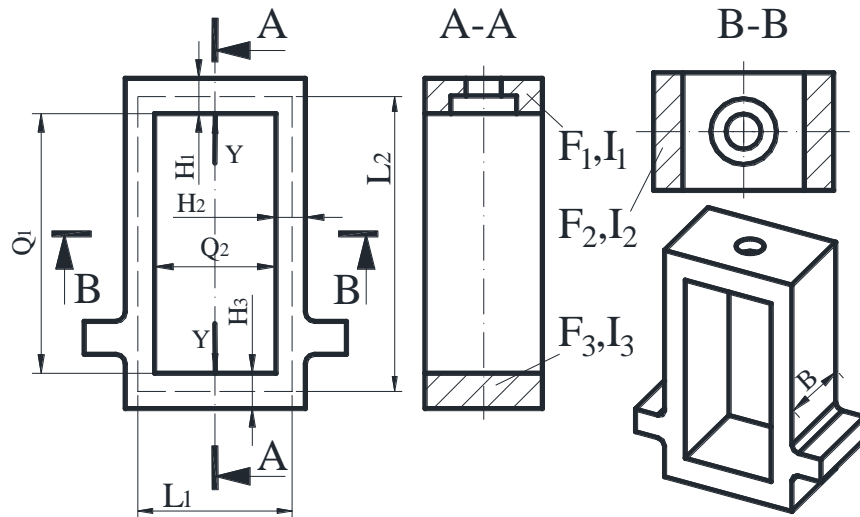


Рисунок 18.1 – Розрахункова схема станини

Величини L_1, L_2 дорівнюють:

$$L_1 = Q_1 + H_1; \quad L_2 = Q_2 + H_2. \quad (18.2)$$

Моменти інерції перерізів поперечок та стійок:

$$I_1 = \frac{BH_1^3}{12}; \quad I_2 = \frac{BH_2^3}{12}; \quad (18.3)$$

Під дією сили прокатки поперечки одержують деформацію згину з максимальним моментом по середині:

$$M_1 = \frac{YL_1}{4} - M_o. \quad (18.4)$$

Напруження згину по середині поперечки

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{W_1}, \quad (18.5)$$



де $W_1 = \frac{BH_1^2}{6}$. – момент опору згинів перерізу верхньої або нижньої поперечок.

На стійку діє розтягання від сили Y і прогин від статично невизначеного моменту M_0 , який викликає розтягання стійки з боку вікна і стиск із зовнішньої сторони. Напруження у стійці:

$$\sigma_2 = \frac{Y}{2 \cdot F_2} \pm \frac{M_0}{W_2}, \quad (18.6)$$

де $F_2 = H_2B$ – площа перерізу стійки;

$W_2 = \frac{BH_2^2}{6}$. – момент опору згинів перерізу стійки.

Знак (+) відноситься до напружень у стійці з боку вікна, де вони максимальні, знак(-) – до зовнішньої сторони стійки.

З урахуванням математичного забезпечення автоматизованому проектуванню конструктивних параметрів станини підлягають товщина поперечки H_1 і товщина стійки H_2 , що забезпечують такі техніко-економічні показники:

- забезпечення необхідної міцності;
- забезпечення мінімальної металоємності;
- забезпечення напружень у стійці та поперечки на одному рівні, що підвищує несучу здатність станини.

З урахуванням цього задача оптимізації є двопараметричною. При використанні співвідношення $S = H_1 / H_2$ дану задачу можна звести до однопараметричної, а саме: до визначення раціонального значення величини S , що забезпечує рівноміцність при мінімальній металоємності.

При використанні параметру S можна використати такі вирази:

$$H_2 = \frac{1}{4S} \left[\sqrt{(SQ_2 + Q_1)^2 + 4Sm / (\rho B 10^9)} - (SQ_2 + Q_1) \right]; \quad H_1 = H_2 S, \quad (18.7)$$

де m – маса станини, кг;

ρ – щільність матеріалу станини, кг/м³ ($\rho=7820$ кг/м³).

Схема рішення зводиться до визначення S за умовою рівноміцності $[\sigma_1 = \sigma_2]$ з подальшим зіставленням напружень з допустимим і покроковим збільшенням маси m в разі невиконання умови міцності. Блок-схема алгоритму з автоматизованого проектування вузла станин з умови рівноміцності зображена на рис. 18.2.

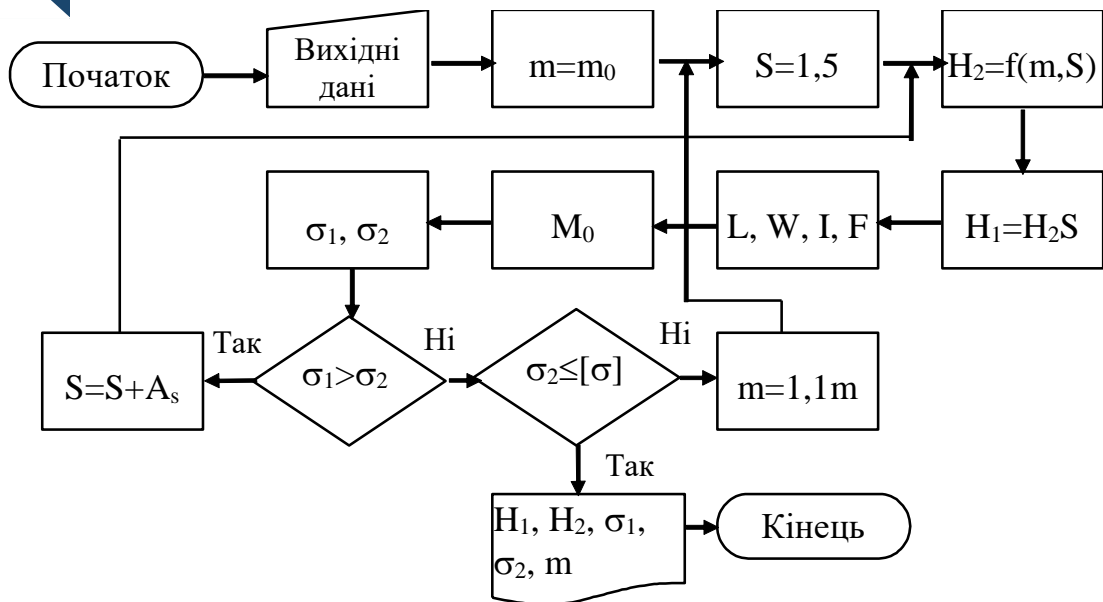


Рисунок 18.2 – Блок-схема алгоритму з автоматизованого проектування вузла станини з умови рівномірності

Крім розрахунку напружень виконують розрахунок деформацій поперечок і стійок станини за вертикальною віссю [11]. Горизонтальну деформацію станини вважають незначною і в наближених розрахунках не враховують. Деформацію стійок розраховують за формулою

$$\delta_2 = \frac{YL_2}{2EF_2}, \quad (18.8)$$

де E – модуль пружності матеріалу станини. Для литої сталі приймають $E = 2 \times 10^5$ МПа.

Деформацію поперечок розраховують від згинального моменту і сили, що перерізує.

Деформація поперечок від згинального моменту

$$\delta_1 = \frac{L_1^2}{8EI_1} \left(\frac{YL_1}{6} - M_o \right), \quad (18.9)$$

від сили, що перерізує,

$$\delta_3 = k \frac{YL_1}{4GF_1}, \quad (18.10)$$

де G – модуль пружності другого роду (модуль зрушення). Для сталевого лиття $G = 8 \times 10^4$ МПа;

k – коефіцієнт форми перерізу, для прямокутного перерізу дорівнює 1.2

Сумарна вертикальна деформація станини

$$\delta = 2\delta_1 + 2\delta_3 + \delta_2. \quad (18.11)$$

Модуль жорсткості станини

$$G_{st} = Y / \delta. \quad (18.12)$$

З урахуванням математичного забезпечення автоматизованому проектуванню конструктивних параметрів станини підлягають товщина поперечки H_1 і товщина стійки H_2 , що забезпечують такі техніко-економічні показники:

- забезпечення необхідної міцності;
- забезпечення мінімальної металоємності;
- забезпечення необхідної жорсткості, що гарантує отримання кінцевої різнотовщинності прокату згідно із стандартами.

Схема рішення зводиться до визначення S за умови забезпечення необхідної жорсткості з подальшим зіставленням напружень з допустимим і покроковим збільшенням маси m в разі невиконання умови міцності. Блок-схема алгоритму з автоматизованого проектування вузла станин з умови забезпечення необхідної жорсткості подана на рис. 18.3

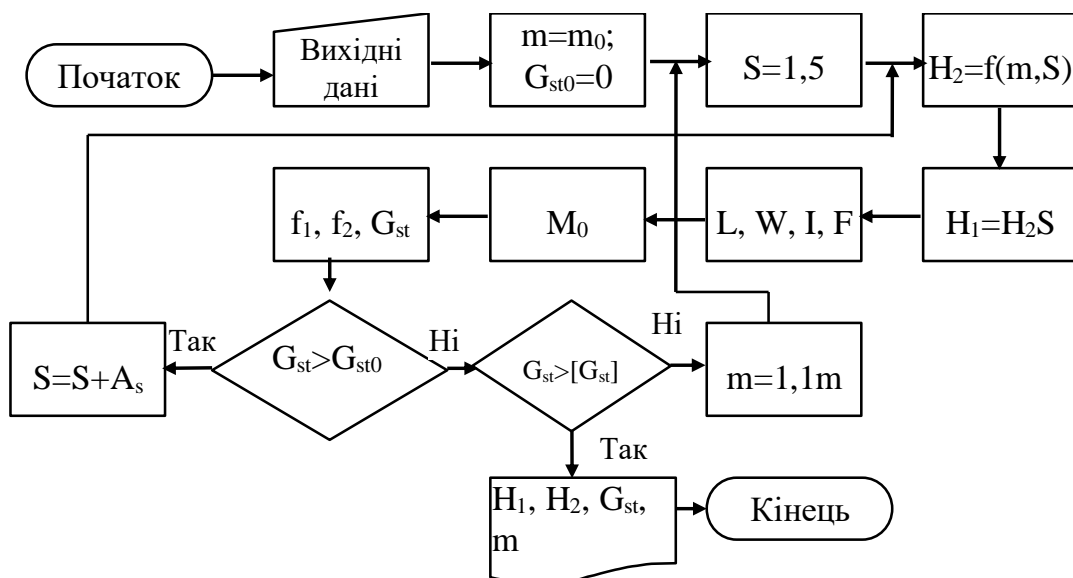


Рисунок 18.3 – Блок-схема алгоритму з автоматизованого проектування вузла станин з умови забезпечення необхідної жорсткості

Порядок виконання роботи

1. Включити ЕОМ, набрати ім'я користувача і пароль, завантажити операційну систему.
2. Запустити програмну оболонку.
3. Набрати і налагодити програму з автоматизованого проєктування станини робочої кліти прокатного стану.
4. Запустити програму на виконання, ввівши при цьому такі вихідні дані: $Y = n \cdot 10^5$ Н; $Q_1 = 7000$ мм; $Q_2 = 2800$ мм; $b = 350$ мм; $m = 15000$ кг; $[\sigma] = 90$ Н / мм², $[G_{st}] = n \cdot 10^5$ Н / мм де n – порядковий номер студента в журналі викладача.
5. Записати отримані результати.
6. Скласти звіт про виконану роботу.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні типи станин робочих клітей прокатних станів.
2. З якої умови визначається геометричні розміри вікна станини?
3. Яким чином визначити оптимальне значення маси станини?
4. Як забезпечити рівномірність станини?
5. Назвіть фактори, що впливають на пружну деформацію станини.
6. З якої умови визначаються геометричні розміри стояка станини?
7. Яким чином визначити жорсткість станини?
8. Як забезпечити отримання необхідної жорсткості станини?



СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Metallurgy, 1980. – 320 с.
2. Теория прокатки : справочник / А.И. Целиков и [др.]. – М. : Metallurgy, 1982. – 335 с.
3. Третьяков А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. Н. Зюзин. – М. : Metallurgy, 1973. – 224 с.
4. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 244 с. – 978-966-379-389-4.
5. Бронштейн И. Н. Справочник по математике (для инженеров и учащихся вузов) / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука. – 1981. – 720с.
6. Потапкин В. Ф. Математическая модель механических свойств и запаса пластичности меди и медноцинковых сплавов при холодной прокатке / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, Ю. К. Добронос // Известия вузов. Черная металлургия. –1986. – № 7. – С. 58–61.
7. Андреюк Л. В. Определение давлений металла на валки при горячей прокатке сталей и сплавов широкого сортамента / Л. В. Андреюк // Теоретические проблемы прокатного производства. Теория прокатки : материалы всесоюзн. науч.-техн. конф. – М. : Metallurgy, 1975. – С. 383–385.
8. Третьяков А. В. Дрессировка и качество тонкого листа / А. В. Третьяков, Е. М. Третьякова, Г. Н. Мигачева. – М. : Metallurgy, 1977. – 232 с.
9. Машины и агрегаты металлургических заводов : учеб. для вузов . В 3 т. Т.3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката/ [Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1988. – 680 с.
10. Сатонин А. В. Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества листового металлопроката : учебное пособие / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2009. – 156 с.
11. Королёв А. А. Механическое оборудование прокатных цехов черной и цветной металлургии / А. А. Королёв. – М. : Metallurgy, 1987. – 480 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 - Значення коефіцієнтів, що характеризують рівень механічних властивостей різних металів, та їх залежність від ступеня, швидкості та температур процесу гарячої прокатки

N/n	Матеріал	$\sigma_{то}$, Н/мм ²	a_1	a_2	a_3
1	Сталь 3кп	68,9	0,135	0,164	-2,80
2	Сталь 3сп	87,1	0,124	0,167	-2,54
3	Сталь 5сп	82,1	0,144	0,208	-3,35
4	10	81,8	0,125	0,266	-2,46
5	15Г	86,7	0,126	0,188	-2,74
6	23Г2А	84,8	0,123	0,229	-3,23
7	35ГС	87,4	0,136	0,187	-2,79
8	А35Г2	78,5	0,151	0,122	-3,66
9	3СХГСА	92,0	0,134	0,250	-3,34
10	15ХСНД	82,0	0,122	0,226	-2,90
11	2СХГ2С	96,9	0,125	0,213	-3,65
12	3СХГСНА	102,6	0,116	0,140	-3,42
13	15ХГНТА	100,7	0,108	0,257	-3,25
14	45	87,4	0,143	0,173	-3,05
15	40Х	85,7	0,130	0,170	-3,62
16	40ХН	82,7	0,134	0,234	-3,47
17	40ХГНМ	89,7	0,173	0,144	-2,64
18	38ХМО2	101,6	0,114	0,273	-3,72
19	40ХН2МА	89,5	0,125	0,175	-3,40
20	12ХН3А	88,4	0,095	0,261	-2,84
21	20ХГСНМ	85,2	0,085	0,253	-3,80
22	65Г	73,2	0,166	0,222	-3,02
23	У7А	74,2	0,159	0,197	-2,87
24	У10А	80,1	0,163	0,194	-3,57
25	У12А	74,0	0,173	0,180	-3,36
26	60С2	96,7	0,153	0,197	-3,46
27	60С2ХА	95,5	0,139	0,115	-3,84
28	33А	45,5	0,198	0,074	-3,85
29	ШХ15	80,4	0,137	0,220	-4,07



Таблиця А.2 - Значення коефіцієнтів регресії аналітичного опису інтенсивності деформаційного зміцнення різних металів і сплавів при їх холодній прокатці

N/n	Матеріал	$\sigma_{то}$, Н/мм²	a₁	a₂	a₃
1	Сталь 0	278,9	1224,7	-1516,9	710,4
2	Сталь 0	301,5	1147,3	-1213,1	632,1
3	Сталь 2	241,2	1133,4	-1195,2	525,6
4	Сталь 08кп	294,4	1346,5	-1561,9	629,2
5	Сталь 10сп	388	1215,3	1143,9	487
6	Сталь 20сп	382,4	3051,7	-3821,4	1304
7	Сталь 40	397,9	1913,9	-2165,4	1058
8	Сталь 45	434,8	2481,1	-3457,1	1741
9	Сталь 50	555,7	3020,1	-3924,2	1965
10	Сталь 55	564,5	1427,6	-2057,1	1047
11	Сталь 12Г2А	459,4	2893,5	-4565,1	2735
12	Сталь 65Г	380,2	1388,9	-989,6	329,4
13	Сталь У8А	412,4	2480,9	-3244,2	1694
14	Сталь У10А	543,7	1633,0	-1358,4	460
15	Сталь У12	487,3	2053,5	-2861,6	1485
16	Сталь 30ХГСА	529,1	2371,3	-2488,9	1041
17	Сталь Х18Н9	87,6	1144,9	-1594,4	794,3
18	Медь техническая	112	1484,7	-1555,0	643,9
19	Латунь Л58	149,9	1295,8	-1257,3	548,8
20	Латунь Л63	126,7	1740,0	-1867,1	803,8
21	Бронза Бр.Мн20	146,8	1517,1	-2168,1	1080
22	Мельхиор МН19	759,1	644,6	-920,0	450,3
23	Сплав ВТ5-1	100,3	973,5	-1723,1	930,8

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 – Типорозміри різей згідно з ГОСТ 24705-2004 (ISO 724:1993) (крок – 2 мм, висота профілю – 1,082 мм), мм

Діаметр різі					
зовнішній	середній	внутрішній	зовнішній	середній	внутрішній
(18)	16,701	15,835	(76)	74,701	73,835
20	18,701	17,835	80	78,701	77,835
(22)	20,701	19,335	(85)	83,701	82,835
24	22,701	21,835	90	88,701	87,835
(27)	25,701	24,835	(95)	93,701	92,835
30	28,701	27,835	100	98,701	97,835
(33)	31,701	30,835	(105)	103,701	102,835
36	34,701	33,835	110	108,701	107,835
(39)	37,701	36,835	(115)	113,701	112,835
42	40,701	39,335	(120)	118,701	117,835
(45)	43,701	42,835	125	123,701	122,835
48	46,701	45,835	(130)	128,701	127,835
(52)	50,701	49,335	140	138,701	137,835
58	54,701	53,835	(150)	148,701	147,835
(60)	58,701	57,835	160	158,701	157,835
64	62,701	61,835	(170)	168,701	167,835
(68)	66,701	65,835	180	178,701	177,835
72	70,701	69,335	(190)	188,701	187,835
–	–	–	200	198,701	197,835

Таблиця В.1 – Основні розміри натискних гвинтів, мм

Діаметр натискного гвинта Dн	Шаг різі для ряду S			Діаметр натискного гвинта Dн	Шаг різі для ряду S		
	1-го	2-го	3-го		1-го	2-го	3-го
100	2	–	12	320	8	20	40
120	3	8	16	340	–	–	40
140	–	–	16	360	10	24	48
160	4	10	20	400	10	24	48
180	–	–	20	440	10	24	48
200	5	12	24	480	12	–	–
220	–	–	24	520	12	–	–
240	6	16	32	560	12	–	–
260	–	–	32	600	16	–	–
280	6	16	32	630	16	–	–
300	–	–	40	670	16	–	–

Примітка. Залежно від типу прокатного стану і його призначення крок різі вибирають з 1, 2 або 3-го ряду.

Таблиця Г.1 – Типорозміри ущільнень згідно з ГОСТ 9833-73 (кільце перерізом 5,8 мм), мм

Позначення типорозміру кільця	Номинальне значення внутрішнього діаметра кільця	Позначення типорозміру кільця	Номинальне значення внутрішнього діаметра кільця	Позначення типорозміру кільця	Номинальне значення внутрішнього діаметра кільця
053-063-58	52,0	125-135-58	122,5	220-230-58	216,0
055-065-58	54,0	130-140-58	127,5	225-235-58	221,0
056-066-58	55,0	135-145-58	132,5	230-240-58	226,0
060-070-58	59,0	140-150-58	137,5	235-245-58	231,0
061-071-58	60,0	145-155-58	142,5	240-250-58	236,0
063-073-58	61,0	150-160-58	147,5	245-255-58	241,0
065-075-58	63,5	155-165-58	152,0	250-260-58	245,5
070-080-58	68,5	160-170-58	157,0	255-265-58	250,5
071-081-58	70,0	165-175-58	162,0	260-270-58	255,5
075-085-58	73,5	170-180-58	167,0	265-275-58	260,5
080-090-58	78,5	175-185-58	172,0	270-280-58	265,5
085-095-58	83,5	180-190-58	177,0	275-285-58	270,5
090-100-58	88,5	185-195-58	182,0	280-290-58	275,0
095-105-58	93,0	190-200-58	187,0	285-295-58	280,0
100-110-58	98,0	195-205-58	191,0	290-300-58	295,0
105-115-58	103,0	200-210-58	196,5	295-305-58	290,0
110-120-58	108,0	205-215-58	201,5	300-310-58	294,5
115-125-58	113,0	210-220-58	206,5	310-320-58	304,5
120-130-58	118,0	215-225-58	211,5	—	—