

ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ І ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ГОЛОВНУ ЛІНІЮ ПРИВОДА Й РОБОЧУ КЛІТЬ ПРОКАТНОГО СТАНА

Нестійкий процес прокатки і його динамічні впливи на головну лінію прокатного стану

При прокатці у валках найчастіше виникає явище буксування. При цьому буксування буває частковим або повним.

Прийнято розрізняти наступні типи буксування:

- короткочасні, з наступним переходом до стійкого процесу прокатки;
- інтенсивні, із частими захватами металу й проковзуваннями;
- повні, із припиненням пластичної деформації металу і його зупинкою при обертових валках.

Як правило, при буксуванні на поверхні металу залишаються сліди, однак поверхня може залишатися й гладкою.

Основна причина нестійкого процесу прокатки (буксування) – це зниження величини коефіцієнта тертя на контактних поверхнях між робочими валками й прокочує металом, що.

Які ж фактори впливають на величину коефіцієнта тертя? В основному це наступне:

- окалина на поверхні металу;
- стан поверхні валків і матеріал, з якого вони виготовлені;
- окружна швидкість обертання валків;
- величина обтиснення в проході;
- температура нагрівання металу;
- хімічний склад металу, що прокочує;
- питомий тиск (при холодній прокатці);
- недотримання закону сталості обсягу між клітьями (для безперервних станів).

Розглянемо більш докладно вплив, наприклад, окалини.

Окалина утвориться на металі при високій температурі й зберігається на злитку при його транспортуванні. Окалина повністю віддаляється тільки після декількох проходів.

Процес руйнування окалини відбувається поступово, тому по довжині розкату стан і кількість окалини неоднаково. Внаслідок цього коефіцієнт тертя в різних місцях заготовки буде різним, що й приводить до виникнення пробуксовок із захватами, що чергуються.

Часткова короткочасна пробуксовка валків може бути пояснена тим, що в міру повороту валків окалина руйнується, змінюється характеристика поверхні металу, збільшується коефіцієнт тертя, а виходить, підвищується сила зчеплення металу з валками й пробуксовка закінчується.

Припинення процесу буксування, як правило, домагаються шляхом зниження швидкості прокатки.

Буксування досить небезпечно, його виникнення приводить до

наступного:

- збуджує динамічні навантаження в головній лінії стана;
- сприяє швидкому зношуванню валків;
- зменшує продуктивність стана;
- порушує цикл прокатки, що утрудняє автоматизацію стана.

Очевидно, що при буксуванні виникають більші динамічні навантаження, тому що буксування приводить до наступного:

- зміні швидкості плинину металу;
- періодичному захвату;
- зміні (зменшенню) корисного опору машини;
- виникненню перехідних процесів в електродвигунах привода стана.

Для прокатних станів особливо небезпечні динамічні навантаження, що проходять через нуль і змінюють свій напрямок. При цьому відбувається розкриття зазорів у приводних лініях з періодичними пружними ударами й різким підвищенням загальної напруженості приводної лінії.

Характер коливальних процесів у головній приводній лінії при нестійкому процесі прокатки визначається характером зміни крутних моментів на валках, що залежить від наявності й характеру пробуксовки, а також деяких інших факторів (биття валків, розкид механічних властивостей, різнотовщинність і т.д.).

Як показують експериментальні дослідження, при пробуксовці можна виділити наступні характерні випадки коливальних процесів у приводних лініях:

- коливання низької частоти;
- автоколивання, близькі до гармонійного;
- релаксійні автоколивання.

Коливання низької частоти

Коливання низької частоти виникають в основному при наявності на підкаті грубої окалини, коли її руйнування відбувається в міру повороту валків.

По теорії О. П. Чекмарьова відновлення контактної поверхні відбувається пропорційно куту повороту валка (і закінчуватися при куті повороту (рівному куті захвата).

Тобто при $\varphi_v = \alpha$ буде новий зрив.

При цьому тиск металу на валки буде змінюватися від мінімального (близького до нуля) значення до максимального (близького до тиску при сталому процесі), а потім тиск знову зменшиться.

У процесі руйнування окалини відбувається чергування захватів і зривів, тому при пробуксовці зміна моменту сил опору спрощено можна представити у вигляді функції кута повороту:

$$M_2 = M_c + M_{пр}\varphi_v / \alpha, \quad (4.1)$$

де M_c – початковий момент (дуже невеликий по величині й

витрачається на холосте обертання робочих валків);

$M_{пр}$ – момент прокатки;

$\varphi_в$ – кут повороту робочого валка;

α – кут захвату металу валками.

Складемо двомасову систему, приводячи її до робочих валків, тоді $\varphi_2 = \varphi_в$.

Диференціальні рівняння руху якоря електродвигуна й робочих валків будуть мати вигляд:

$$\begin{cases} I_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} + c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_1; \\ I_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = M_c + M_{пр} \frac{\varphi_2}{\alpha}. \end{cases} \quad (4.2)$$

Будемо розглядати відношення $M_{пр}/\alpha$ як додатковий пружний зв'язок системи (тобто в нашій двомасовій системі буде не одна, а два пружні зв'язки). Назвемо відношення $M_{пр}/\alpha$ технологічною твердістю при захваті:

$$c_{пр} = M_{пр}/\alpha. \quad (4.3)$$

Рішення системи (4.2) (тримасова система) зведеться до рішення системи двох диференціальних неоднорідних рівнянь, одне з яких містить додатковий член, що містить у собі час (кут повороту). Крім того, слід зазначити, що в нашому випадку буде також дві власних частоти коливань: p_1 (головна) і p_2 (друга), оскільки пружних зв'язків дві.

Рішення системи рівнянь за умови мнених (комплексних) корінь бікватратного частотного рівняння буде мати вигляд (стосовно переміщення валків)

$$\varphi_2 = C_1 \cos p_1 t + C_2 \sin p_1 t + C_3 \cos p_2 t + C_4 \sin p_2 t + (M_1 - M_c) / c_{12}. \quad (4.4)$$

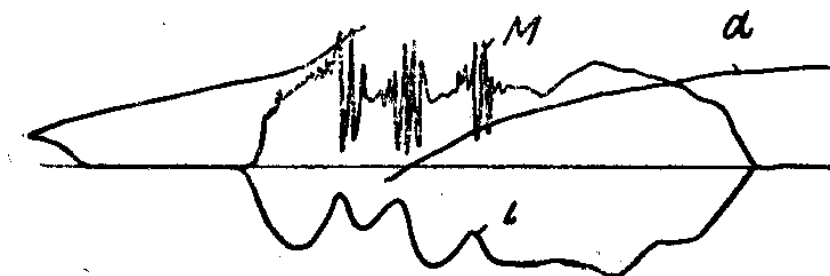
Нехай $M_{1-мс} = M_a$, тоді рівняння моментів сил пружності буде виглядати в такий спосіб:

$$M_{12} = M_a - M_a \left(\frac{p_2^2}{p_2^2 - p_1^2} \right) \left(1 - \frac{I_2 p_1^2}{c_{12}} \right) \cos p_1 t + \\ + M_a \left(\frac{p_1^2}{p_2^2 - p_1^2} \right) \left(1 - \frac{I_2 p_2^2}{c_{12}} \right) \cos p_2 t, \quad (4.5)$$

де частоти p_1 й p_2 можна знайти, використовуючи наступні залежності:

$$\left(\frac{p_{1,2}}{p_0} \right)^2 = \frac{1}{2} \left[(1 - n_1 \gamma) \mp \sqrt{(1 - n_1 \gamma)^2 + 4 n_1 n_2 \gamma} \right]; \\ n_1 = \frac{I_1}{I_1 + I_2}; n_2 = \frac{I_2}{I_1 + I_2}; p_0 = \sqrt{\frac{c_{12}(I_1 + I_2)}{I_1 I_2}}; \gamma = \frac{c_{12}}{c_{12}}. \quad (4.6)$$

При буксуванні лінії стана в ній збуджуються двочастотні коливання – з низькою й високою частотами (рис. 4.1), які залежать від коефіцієнтів розподілу твердості γ і мас системи n_1 й n_2 .



M – момент сил пружності в універсальному шпинделі;
 i – струм електродвигуна; α – кутові переміщення шпинделя
 Рисунок 4.1 – Приклад осцилограми складних коливань пружних моментів із двома частотами при буксуванні

Миттєві динамічні навантаження в системі можуть приймати максимальні позитивні, максимальні негативні або нульові значення, що, як уже говорилося, може приводити до розмикання зазорів і динамічних ударів і може служити причиною руйнування машини.

Автоколивання, близькі до гармонійних

Експериментальні дослідження показали, що в машинах, зокрема в приводах прокатних станів, можуть виникати коливальні процеси з постійними амплітудами при стаціонарних режимах навантаження й відсутності періодичних зовнішніх сил.

Таке явище прийняте називати автоколиваннями.

Автоколивання мають наступні характерні риси:

- постійною незатухаючою амплітудою коливань, підтримуваною зовнішніми силами;
- поповнення витраченої енергії на коливання відбувається за рахунок постійного джерела енергії (у нашому випадку електродвигуна);
- величина амплітуд залежить від коливальних характеристик системи й не залежить від початкових умов;
- період коливань, як й амплітуда, визначається власними характеристиками системи;
- немає періодичної зміни зовнішніх сил, тобто періодичний характер коливань створюється за рахунок неперіодичного джерела зовнішніх сил;
- автоколивання зникають відразу ж після зникнення причин, що їх викликають.

Додаткові навантаження від автоколивань, як показують дослідження, можуть досягати значних величин й їх варто враховувати при розрахунку деталей приводів на втомлювальну витривалість.

Спостерігається два основних види автоколивань:

- гармонійні (або близькі до них) (рис. 4.2, а);
- релаксаційні (розривний характер) (рис. 4.2, б).

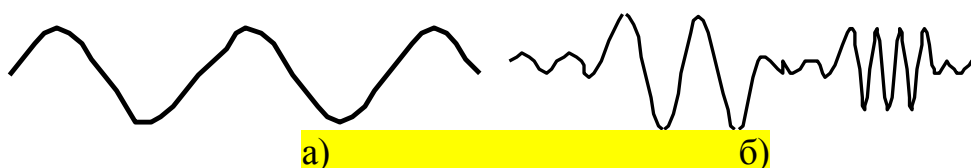
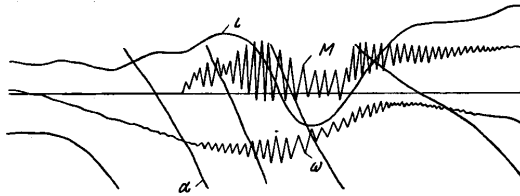


Рисунок 4.2 – Приклади осцилограм гармонійних (а) і релаксаційних (б) коливань

При невеликій зміні сил тертя в системі збуджуються коливання, близькі до синусоїдальних, із частотою, що мало відрізняється від власної частоти коливань системи (рис. 4.3).



M – момент сил пружності в універсальному шпинделі; i – струм електродвигуна; ω – швидкість обертання електродвигуна; α – кутові переміщення шпинделя

Рисунок 4.3 – Приклад осцилограми автоколивань, близьких до гармонійних

Якщо змінне тертя значне, то виникають автоколивання релаксаційні (або розривні), що істотно відрізняються від гармонійних. Частота цих коливань більше, ніж власна частота системи (рис. 4.4).

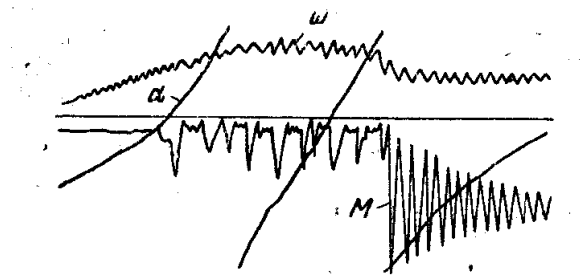


Рисунок 4.4 – Приклад осцилограми релаксаційних автоколивань блюмінга 950

Єдиної чіткої теорії про причину виникнення автоколивань у цей час немає. Основними з таких теорій є наступні:

теорія Н. Л. Кайдашевського і С. Э. Хайніна – автоколивання викликаються падаючою характеристикою сил тертя залежно від відносної швид-кості ковзання;

теорія А. Ю. Ішлинського та І. В. Каргельського – причина виникнення автоколивань полягає в залежності сил тертя від тривалості нерухомого контакту третьових поверхонь.

Жодна з теорій не дає повної картини й точного пояснення. Як прийнято говорити, теорії доповнюють одна одну.

Незалежно від прийнятої теорії причина виникнення автоколивань укладена в природі сил тертя.

Релаксаційні автоколивання

Виникнення їх можна описати так:

- моменти в лінії зростають при відсутності відносного руху між валками й металом;

- момент сил пружності досягає величини моменту тертя спокою, відбувається зрив валків;
- під дією сил пружності й тертя відбуваються коливання валків;
- між металом і валками з'являється змінна відносна швидкість;
- відразу після зриву валки рухаються в напрямку моменту електродвигуна;
- швидкість міняється, а зі зміною її змінюються й швидкість ковзання й момент сил тертя. Коли вони стануть рівні (M_{12} і $M_{тр}$) – знову зупинка і новий цикл.

Аналітичний опис цього процесу практично неможливо – немає опису тертя, а використання експериментальних даних має локальний характер.

Вплив динамічного навантаження на зміну пружної деформації робочої кліті й точність прокату

Точність геометричних характеристик готового металопрокату визначається під час прокатки. Зміна розмірів смуги відбувається внаслідок зміни пружних деформацій навантажених частин робочої кліті, які є результатами зміни тиску металу на валки й динамічного навантаження пружної системи робочої кліті.

Фактори, що впливають на зміну тиску при прокатці, а отже, пружної деформації кліті:

- зміна температури металу;
- неоднорідність металу (хімічний склад і структура);
- мінливість розмірів підкату;
- натяг смуги;
- тертя між валками й смугою;
- биття валків і т.д.

Отже, всі причини, що викликають зміну тиску металу на валки, будуть одночасно впливати й на зміну деформації робочої кліті, а отже, і на точність геометричних характеристик підкату.

При звичайних розрахунках величини пружини кліті не враховують характер зміни навантаження в часі, тобто завдання розглядають як статичну.

Однак у реальності перехідні й несталі процеси, що мають місце при прокатці, можуть використатися для статичних розрахунків тільки з дуже більшим допущенням.

Розглянемо робочу кліть прокатного стану.

Система є досить складною, однак її можна представити у вигляді одномасової розрахункової схеми (рис. 4.5).

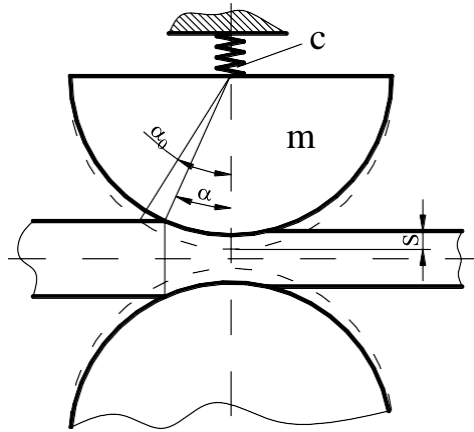


Рисунок 4.5 – Розрахункова схема для визначення пружної деформації робочої кліті

Диференціальне рівняння руху маси такої системи буде мати такий вигляд:

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} + cS = F(\tau), \quad (4.7)$$

де m – наведена маса валків з подушками, що врівноважує механізму й інших елементів;

S – пружна деформація робочої кліті;

z – твердість зв'язку (кліті);

$F(\tau)$ – сила, що обурює, що змінюється в часі.

Розглянемо процес захвата металу валками. У початковий момент часу ($t = 0$) навантаження відсутні. У цьому випадку рішення рівняння буде мати вигляд

$$S = \frac{1}{mp} \int_0^t F(\tau) \sin p(t - \tau) d\tau, \quad (4.8)$$

де τ - змінна, що змінюється від 0 до t ;

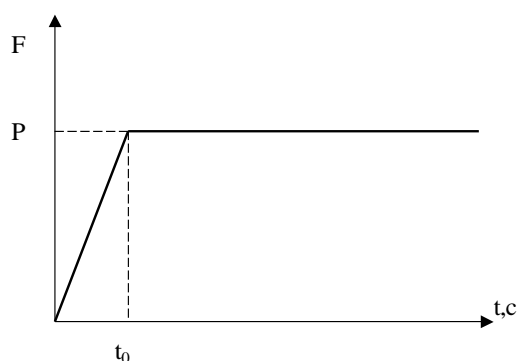
p – власна частота коливань пружної системи робочої кліті.

Для аналізу процесу захвата металу валками прийемо лінійний характер наростання навантаження в системі (тиск металу на валки) (рис. 4.6):

$$F(\tau) = P \frac{t}{t_0} \quad - \text{при } t = 0 \dots t_0; \quad (4.9)$$

$$F(\tau) = P \quad - \text{при } t > t_0,$$

де P – повна сила прокатки;
 t_0 – час захвата металу валками.



Малюнок 4.6 – Закон наростання навантаження при захваті металу валками

Підставивши значення $F(\tau)$, маємо:

$$S = \frac{P}{mp^2} - \frac{P}{mp^2} \frac{\sin pt_0}{pt_0} \cos pt_0 + \frac{P}{mp^2} \frac{1 - \cos pt_0}{pt_0} \sin pt_0. \quad (4.10)$$

Виразивши через одну тригонометричну функцію, будемо мати:

$$S = S_{ст} + S_{ст} \frac{\sin \pi\lambda}{\pi\lambda} \sin(pt + \gamma), \quad (4.11)$$

де $S_{ст} = P/mp^2$ – статична деформація робочої кліті;

$\lambda = \frac{t_0}{T}$ – відношення часу захвата до періоду коливань пружної системи кліті;

теми кліті;

$p = \sqrt{c/m}$ – частота власних коливань системи;

$\gamma = -\arctg \frac{\sin 2\pi\lambda}{1 - \cos 2\pi\lambda}$ – допоміжний параметр;

$T = p/2\pi$ – частота коливань системи.

З виразу (4.11) можна зробити висновок, що в загальному випадку при динамічному захваті пружна деформація робочої кліті складається зі статичної деформації й динамічної складової (рис. 4.7). Амплітуда коливань деформацій залежить від параметра λ : чим менше λ , тим більше динамічна амплітуда й загальна деформація кліті в момент захвата (рис. 4.8). При (≥ 5) динамічна складова деформацій не перевищує 5 % від статичної.

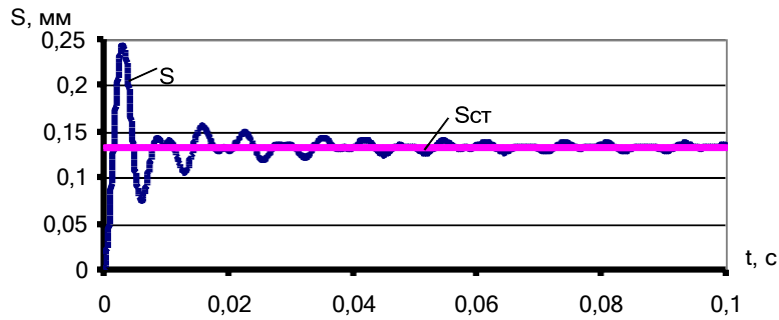


Рисунок 4.7 – Характер зміни пружної деформації кліті при захвату металу валками

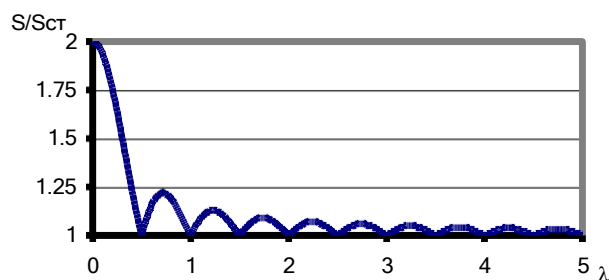


Рисунок 4.8 – Залежність динамічної складової деформації від параметра її навантаження

Коливання сумарної пружної деформації робочої кліті можуть позначитися на точності розмірів прокату, особливо при порівняно більших деформаціях і малій товщині смуги. Відповідно переміщенню S будуть змінюватися напруги й зусилля в пружних зв'язках робочої кліті, що необхідно враховувати при розрахунках.

Як приклад розглянемо кліть кварто безперервного стану холодної прокатки $500/1300 \times 1200$. Пружну систему робочої кліті можна представити у вигляді одномасової розрахункової схеми, представленій на рис. 4.9, де m – наведена маса робочого валка, z – сумарна твердість станини робочої кліті (твердість кліті) і контакту робочого й опорного валків.

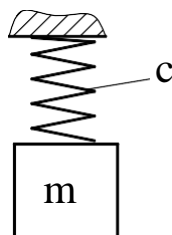


Рисунок 4.9 – Еквівалентна схема пружної системи кліті

Твердість окремих елементів станини зручно виразити через зворотну величину – піддатливість.

Для розглянутого стана:
наведена твердість

$$c = \frac{1}{e_1 + e_2 + \dots + e_7} = 9,75 \times 10^9 \text{ Н/м},$$

де $e_1 \dots e_7$ – піддатливості основних елементів кліті (додаток А);
наведена маса

$$m = 23150 \text{ Нс}^2 / \text{м}.$$

Відповідно частота й період коливань системи:

$$p = \sqrt{c/m} = 650 \text{ с}^{-1}; \quad T = 2\pi/p = 0,0097 \text{ с}.$$

Мінімальна тривалість захвата металу валками останньої кліті (за умови рівної крайки листа, що задають, для станів холодної прокатки) при швидкості прокатки 15 м/с і довжині дуги контакту 5 мм дорівнює 0,00033 с. Тоді мінімальна величина параметра додатка навантаження складе $\lambda_{\min} = 0,034$. При цьому відповідно до графіка $S/S_{CT} = f(\lambda)$ (див. рис. 4.8) дійсна деформація кліті дорівнює в перший період захвата металу валками подвоєному значенню статичної деформації. Потім коливання загасають і деформація наближається до статичного. Для інших клітей з меншою швидкістю захвата й більшою довжиною осередку деформації відношення t_0/T зменшується й при $\lambda > 3$ динамічна складова пружної деформації кліті не перевищує 10 % від статичної.

Література [1, с.84-106; 232-238]; [4, с. 26-50].