

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-20>

УДК 621.771.066:681.518.54:531.3

В. В. Вереньов¹, д.т.н., ст.н.с., ORCID 0000-0002-2561-5365**С. В. Білодіденко**², д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-5768-594X**В. В. Коренной**^{1,*}, н.с., ORCID 0000-0002-8329-781X**Г. І. Сокол**³, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-6183-9155¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України² Український державний університет науки і технологій³ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара* Автор для листування: koren_noy@ukr.net

ДІАГНОСТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДИНАМІКИ ВЗАЄМОДІЇ СУМІЖНИХ ПРОКАТНИХ КЛІТЕЙ ЧЕРЕЗ ПОЛОСУ

Анотація. Розглядаються динамічні процеси – момент сил пружності в лініях приводу валків і вібрація обладнання в режимі взаємодії двох клітей під час захвату полоси та сумісної прокатки. Визначені особливості коливань параметрів, коли в попередній кліті ведеться прокатка товстої полоси і в цей час відбувається її захват в наступній кліті. З-за наявності зносу та зазорів реакція ділянок лінії приводу запізнюється: чим вони більше, тим більше час запізнення. Шляхом дослідів на діючих станах доведено, що цей час являється достатньо важливим діагностичним показником. Запропоновано використати цю особливість у шестиклітьових групах безперервної прокатки. Доведено, що подібним показником слугує швидкість розповсюдження ударної хвилі вздовж лінії приводу від кліті до двигуна. Ведеться порівняння часу запізнення і швидкості при захваті полоси та взаємодії клітей через полосу. Способи реалізуються шляхом розміщення датчиків вібрації на відповідних ділянках лінії приводу.

Ключові слова: прокатна кліть, діагностика, вібрація, технічний стан, зазори, час запізнення, лінія приводу, робочі валки, обладнання, безперервна прокатка.

Посилання для цитування: Діагностичні властивості динаміки взаємодії суміжних прокатних клітей через полосу / В. В. Вереньов, С. В. Білодіденко, В. В. Коренной, Г. І. Сокол // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 325-332. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-20>

© В. В. Вереньов, С. В. Білодіденко, В. В. Коренной, Г. І. Сокол, 2025

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Мета роботи полягає у тому, щоб визначити особливості перехідних процесів під час безперервної прокатки гарячої полоси в декількох клітках і можливість їх використання для встановлення поточного технічного стану обладнання. Наведені відповідні приклади динамічних процесів і можливості їх застосування у діагностичних системах.

Вступ. Динаміка взаємодії суміжних прокатних клітей через полосу досліджена достатньо повно. В період захвату метала валками наступної кліті визначені особливості формування поздовжнього зусилля в смузі, моменту сил пружності в лініях приводу валків, вібрація обладнання та інші. Максимальний момент сил пружності в перехідний період на шпинделях і валу двигуна відповідно в 2 – 2,5 і 3 – 4 рази перевищує момент в сталому режимі прокатки. Значно впливають на динаміку взаємодії клітей знос та зазори в зчленуваннях ліній приводу. З метою їх визначення запропоновані нові діагностичні показники – час запізнення реакції ділянок та швидкість розповсюдження ударної хвилі від валків до двигуна [1, 2]. Чим більше зазори тим більше час і менше швидкість. Поряд з цим виникають питання відносно подальших досліджень і використання результатів.

Розглянемо запропоновані нові діагностичні показники на прикладі стана 1680 комбінату «Запоріжсталь». Сляби подвоєної довжини товщиною 110...150 мм прокатують в безперервному режимі в парах чорнових клітей дуо - №1 після чого послідовно в клітках №2 - №3 і №3 - №4. Відстань між клітками становить відповідно 6,25 м, 19 м і 25 м. В різних режимах прокатки (рис. 1) початкова реакція в лінії кліті дуо формується у вигляді максимального піка моменту, що свідчить про ударну дію масивного слябу по валкам кліті №1.

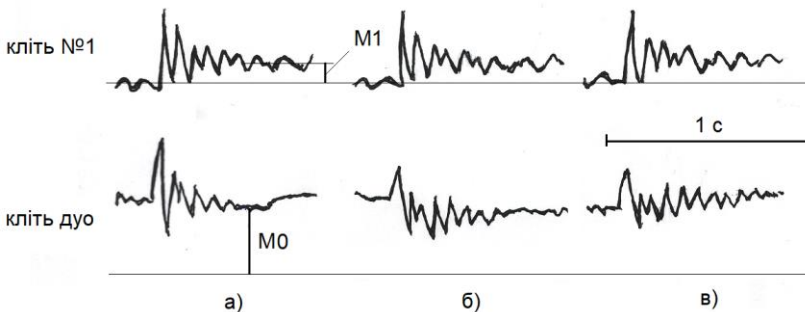


Рисунок 1 - Реакція лінії приводу кліті дуо на захват сляба в кліті №1 на прикладі моментів сил пружності, де M1, M0 – статичне значення моментів сил пружності у кліті №1 та дуо: а) узгоджений режим, б) натяг; в) підпор.

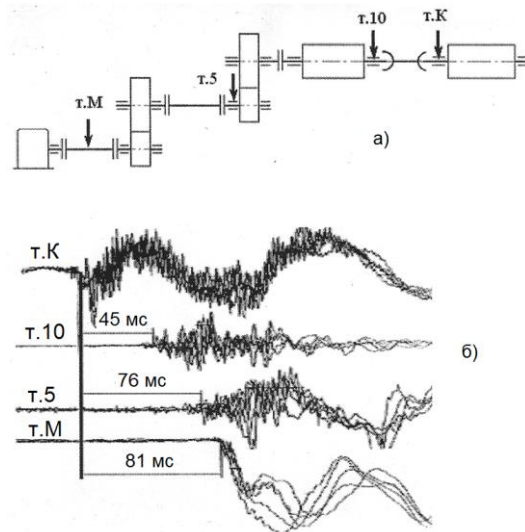


Рисунок 2 – Схема лінії приводу кліті дуо (а) і типові сигнали вібрацій і моменту сил пружності на проміжному валу під час захвату сляба (б): т. К - станина кліті, т. 10 - корпус шестеренної кліті, т. 5 - корпус редуктора, т. М - момент сил пружності.

Завдяки значній поздовжній жорсткості сляба коротке ударне навантаження (підпор) в зворотному напрямку одночасно діє на валки та кліть дуо і далі до двигуна. Схема лінії приводу кліті дуо наведена на рисунку 2а. Оскільки лінія приводу знаходиться в напруженому стані, її реакція випереджає реакцію лінії кліті №1. На рисунку 2б одержані досить стабільні перехідні процеси завдяки тому, що сляби у кліть дуо задавались з постійною швидкістю.

Важливо відзначити, що реакція лінії приводу кліті дуо на захват сляба в кліті № 1 відбувається під час прокатки, коли лінія приводу напружена і зазори в з'єднаннях закриті (рис. 3).

Тому час проходження (реакції) крутильного ударного імпульсу від станини кліті до кожної ділянки лінії приводу приймає своє найменше значення. Це важливий момент, яким необхідно скористатися. З'являється можливість одержувати постійні середні значення часу запізнення для різних ділянок лінії приводу. Шляхом порівняння часу реакції ділянок, одержаних під час захвату металу валками в кліті дуо, з найменшими їх значеннями при взаємодії визначають наскільки

розвинуті знос і зазори, тобто технічний стан обладнання. Наприклад, згідно рисунку 2 час реакції шпindelльної ділянки при захваті сляба коли впливають зазори становить 45 мс, майже в 5 разів перевищує час запізнення 8 мс при взаємодії клітей на рисунку 3. Одночасно з цим загальний час реакції моменту дорівнює 81 мс проти 11,4 мс. Їх відношення дорівнює 7,1 і вказує на загальний стан лінії приводу. Тому періодичне визначення цих відношень дозволяє характеризувати ступінь зносу на ділянках, наприклад, вкладишів універсальних шпindelів.

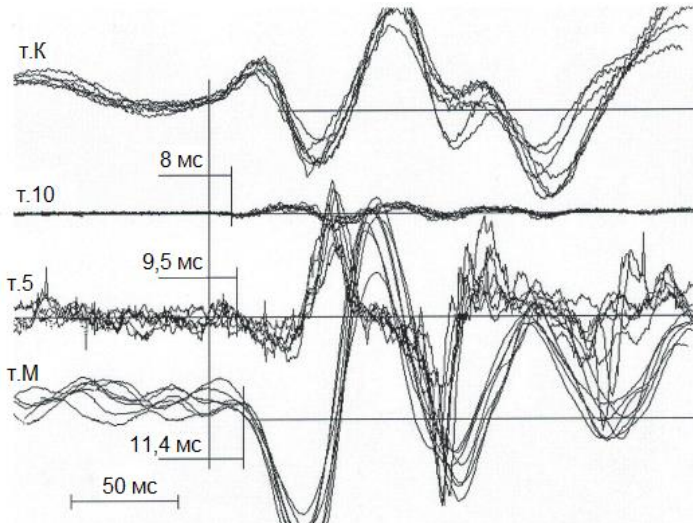


Рисунок 3 - Перехідні процеси і запізнення реакції ділянок лінії приводу кліті дуо при захваті слябів у кліті №1: т. К - станина кліті, т. 10 - корпус шестеренної кліті, т. 5 - корпус редуктора, т. М - момент сил пружності.

Подібна ситуація складається і в безперервній чистовій групі прокатних клітей. При відстані між клітями 6 м в тонкій смузі послідовно із захватом формується натягіння, а в механічному обладнанні сплеск вібрації. Завдяки цій особливості визначення зносу та зазорів можливе одночасно в усіх клітях під час прокатки однієї полоси. На прокатних станах з окремими клітями та поштучній прокатці запропоновано спосіб попередньої прокатки з частковим обгисненням передньої частини полоси по довжині, наприклад, до 1 м. За рахунок цього на полосі формується штучне відхилення товщини, захват якого робочими валками під час повторної прокатки вже з

потрібним обтисненням супроводжується сплеском вібрації обладнання при закритих зазорах. В [2] наведено цей спосібна прикладі безперервної багатониткової прокатки на сортових станах. Час запізнення ділянок лінії приводу при захваті першої полоси (коли впливають зазори) порівнюють з меншим часом запізнення при захваті наступних полос вже при закритих зазорах.

Важливим додатковим показником технічного стану ділянок лінії приводу є швидкість розповсюдження ударної хвилі вздовж обладнання лінії приводу – від станин кліті до двигуна. Тіло універсального шпинделя кліті дуо представляє собою сталевий циліндр довжиною 4,5 м. В подібних деталях швидкість розповсюдження крутильної ударної хвилі дорівнює $V_0 = 3200$ м/с [3]. Згідно наших досліджень під час захвату сляба швидкість такої хвилі в шпинделі дорівнює 100 м/с за рахунок часу 45 мс, який потрібен для замикання зазорів. Під час прокатки при замкнених зазорах її швидкість становить 550 м/с, але менше ніж V_0 . В той же час швидкість ударної хвилі від кліті до двигуна дорівнює 1620 м/с, а між двома редукторами - 1370 м/с. Тому маютья підстави стверджувати, що час запізнення і швидкість ударної хвилі залежать від стану мастила і бруду (окалина, пил) в шарнірах шпинделів та зубчатих зачепленнях, температури навколишнього середовища, тощо. Але їх вплив та значущість залишаються невідомими і заслуговують додаткових досліджень. Динаміка взаємодії клітей №2 - №3 і №3 - №4 через більш тонку та довгу полосу, згідно дослідженням, відбувається через ривки натягу (рис. 4). В цьому випадку, оскільки зазори закриті, маємо найменший час реакції ділянок лінії приводу попередньої кліті, який доцільно сприйняти в якості зразкового для зазначеного вище порівняння.

Інше питання полягає в тому, що пружна ударна хвиля через полосу передається з деяким запізненням від наступної до попередньої кліті, але по різному за рахунок співвідношення швидкості клітей, технічного стану обладнання, технологічних збурень і форми переднього краю по ширині. В кліті №2 дія натягу призводить до зменшення моменту без сплеску, в кліті №3 зі сплеском (рис. 4), як реакція на захват в кліті №4. Важливо знати час запізнення і швидкість розповсюдження ударної хвилі в гарячому металі між клітьми і визначити їх діагностичні властивості.

Під час дослідів на стані 1680 вирішувались інші задачі, для визначення часу передачі пружної хвилі необхідний більш точний інструментарій. Оцінки по часу запізнення моменту сил пружності на проміжних валах згаданих трьох пар клітей вказують на значне відхилення цієї швидкості: в клітях дуо-№1 від 80 м/с до 160 м/с, в

інших парах 700 – 900 м/с, тому скористатися ними неможливо. Для цього необхідні вимірювання безпосередньо, наприклад, вібрації (деформації) станин обох робочих клітей або тиску в системах гідравлічного врівноваження валків, що дозволяє визначати час та швидкість проходження ударної хвилі натягу між клітями, з'ясувати їх залежність від температури металу, ширини, товщини полоси, швидкості прокатки і технічного стану обладнання, зв'язок із маркою сталі.

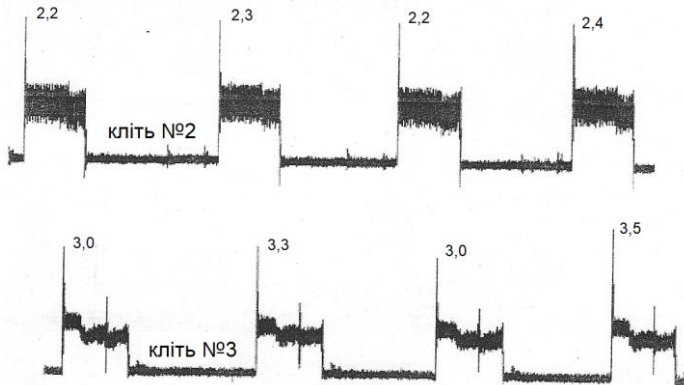


Рисунок 4 - Взаємодія через полосу товщиною 85 мм клітей №2 – №3 і №3 - №4 під час захвату і прокатки.

Таким чином, маються всі підстави для використання динамічних особливостей перехідних процесів при безперервній прокатці з метою діагностичних досліджень, ефективність яких може бути підвищена шляхом незначного розбалансу швидкості в клітях і режиму обтиснення перед захватом полоси.

Висновки

Наведені приклади свідчать про ефективність використання запропонованих ознак і способів для визначення технічного стану лійки привода валків. Важливо те, що встановлення часу реакції і швидкості розповсюдження ударної хвилі при закритих зазорах дозволяє одержати найменші постійні їх значення для різних ділянок в якості зразкових і необхідних для порівнянь, що важливо. Залишається визначити, наскільки вони стабільні в процесі довготривалої роботи обладнання. Значна подібність перехідних процесів вібрації та моменту сил пружності в лійці привоу вказує на те, що запропоновані способи діагностики [1, 2] можуть бути реалізовані на прокатних станах з використанням стаціонарних вібродатчиків, що дозволяє

підвищити якість визначення технічного стану обладнання і обслуговування прокатних станів.

Перелік посилань

1. *Диагностика и динамика прокатных станов*. Монография / В. В. Веренев, В. И. Большаков, А. Ю. Путники, А. А. Коринь, С. В. Мацко / Днепропетровск : ИМА-пресс, 2007. 144 с., 48 ил. ISBN 978-966-331-161-6.
2. *Діагностика прокатних станів у перехідних режимах роботи*. Монографія / В. В. Вереньов / Київ : Наукова думка, 2024. 111 с. ISBN 978-966-00-19.30-0.
3. *Неразрушающий контроль металлов и изделий*. Справочник под ред. Г. С. Самойловича. М. : Машиностроение, 1976. 450 с.

References

1. Verenev, V. V., Bolshakov, V. I., Putnoki, A. Yu., Korin, A. A., & Matsko, S. V. (2007). *Diagnostika i dinamika prokatnykh stanov* [Diagnostics and dynamics of rolling mills] IMA-press
2. Verenev, V. V. (2024). *Diahnostyka prokatnykh staniv u perekhidnykh rezhymakh roboty* [Diagnostics of rolling mills in transient operating modes]. Naukova dumka
3. Samoylovich, G. S. (Ed.). (1976). *Nerazrushayushchiy kontrol metallov i izdeliy* [Non-destructive testing of metals and products] Mashinostroenie

V. V. Verenev¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-2561-5365

S. V. Bilodidenko², D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-5768-594X

V. V. Korennoi^{1*}, Researcher, ORCID 0000-0002-8329-781X

G. I. Sokol³, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-6183-9155

¹ Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

² Ukrainian State University of Science and Technologies

³ Oles Honchar Dnipro National University

* Corresponding author: koren_noy@ukr.net

DIAGNOSTIC PROPERTIES OF THE DYNAMICS OF THE INTERACTION OF ADJACENT ROLLING STANDS THROUGH A STRIP

Abstract. Dynamic processes are considered - the moment of elastic forces in the roll drive lines and the vibration of the equipment in the mode of interaction of two stands during strip capture and joint rolling. The features of parameter fluctuations are determined when a thick strip is being rolled in the previous stand and at this time it is being captured in the next stand. Due to the presence of wear and gaps, the reaction of the drive line sections is delayed: the larger they are, the longer the delay time. Experiments on operating mills have proven that this time is a fairly important diagnostic indicator. It is proposed to use this feature in six-stand groups of continuous rolling. It is proven that a similar indicator is the speed of shock wave propagation along the drive line from the stand to the engine. A comparison of the delay time and speed during strip capture and stand interaction through the strip is

carried out. The methods are implemented by placing vibration sensors on the corresponding sections of the drive line.

Keywords: rolling stand, diagnostics, vibration, technical condition, gaps, delay time, drive line, work rolls, equipment, continuous rolling.

For citation: Verenev, V. V., Bilodidenko, S. V., Korennoi, V. V., & Sokol, G. I. (2025). Diagnostic properties of the dynamics of interaction of adjacent rolling stands through a strip. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 325-332. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-20>

Рукопис надійшов до редакції / Received 24.07.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025