

Аналіз прокатки в режимі рідинного тертя

Олег Максименко

Кафедра металургії чорних металів та обробки металів тиском ім. проф. В.І. Логінова\
металургійний факультет, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське,
Україна

ORCID ID 0000-0003-0846-9869

Анна Приймак

Кафедра металургії чорних металів та обробки металів тиском ім. проф. В.І. Логінова\
металургійний факультет, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське,
Україна

ORCID ID 0009-0009-9070-643X

Крістіна Колесник

Кафедра металургії чорних металів та обробки металів тиском ім. проф. В.І. Логінова\
металургійний факультет, Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське,
Україна

Для цитування цієї статті:

Максименко Олег, Приймак Анна, Колесник Крістіна. Аналіз прокатки в режимі рідинного тертя. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 2, No. 6, 2023, pp. 39-46. doi: 10.46299/j.isjea.20230206.05

Надійшла до редакції: 10 вересня 2023 р.; **Схвалено:** 23 жовтня 2023 р.;

Опубліковано: 01 грудня 2023 р.

Анотація: Розроблена методика оцінювання переходу до режиму контактно-гідродинамічного мастила при прокатуванні. На основі отриманих експериментальних даних показано, що мастильна плівка може зберігати початковий мікрорельєф поверхні металу, а поріг переходу до режиму рідинного тертя може бути при товщині шару мастила меншою, ніж висота нерівностей поверхні валків. Дослідження показують, що механізм мастильної дії у вогнищі деформації багато в чому визначається товщиною масляного прошарку. Від цієї товщини залежить режим тертя в контактні валків і смуги, який може бути граничним, змішаним, контактно-гідродинамічним. У деяких випадках під час прокатки порівняно м'яких металів із досить в'язким мастилом він наближається до рідинного.

Ключові слова: мастильна плівка, мікрорельєф поверхні металу, режим тертя, коефіцієнт тертя, гідродинамічні параметри.

1. Вступ

До класичного гідродинамічного режиму тертя відносять випадки, коли товщина масляного прошарку повністю розділяє поверхні, що труться, тобто

$$\xi_1 \geq R_{zB} + R_{zII}, \quad (1)$$

де ξ_1 – товщина шару мастила на виході з осередку деформації;

R_{zB} і R_{zII} – середня висота мікронерівностей поверхонь валка і прокатуваної смуги, відповідно.

Водночас, на основі дослідження коефіцієнта тертя під час холодного прокатування зразків із мірними шарами мастила О.П. Грудєв дійшов висновку, що режим рідинного тертя настає за умови, коли $\xi_1 = R_{zB}$. При цьому не повинні істотно відрізнятися шорсткості валків і смуги до прокатки $R_{zB} \approx R_{zП}$.

У важко навантаженому контакті, коли на товщину шару мастила, поряд із гідродинамічними параметрами, впливає і пружна деформація контактуючих поверхонь, перехід до пружногідродинамічного режиму механіки визначають наступним чином [2]:

$$\xi_k \geq R_a, \quad (2)$$

де ξ_k – товщина розділового шару мастила у важко навантаженому пружному контакті;

R_a – відхилення від середньої висоти мікронерівностей більш твердої з поверхонь, що контактують.

Необхідно зауважити, що параметр R_a приблизно в чотири-п'ять разів менший за середню висоту мікронерівностей.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Порівняльний аналіз [3] моделей тертя під час холодного прокатування сталей та інших важкодеформованих сплавів і під час пружного важко навантаженого контакту показує, що на коефіцієнт тертя впливають одні й ті самі чинники. Причому цей вплив здебільшого однаковий не тільки в якісному відношенні, а й у кількісному. Очевидно, й умови переходу до режиму гідродинамічного (контактно-гідродинамічного) тертя під час пластичної деформації металу і в пружному контакті істотно відрізнятися не повинні. Проведений же аналіз показав, що поки що умови переходу до рідинного змащення чітко не визначені.

3. Мета та задачі дослідження

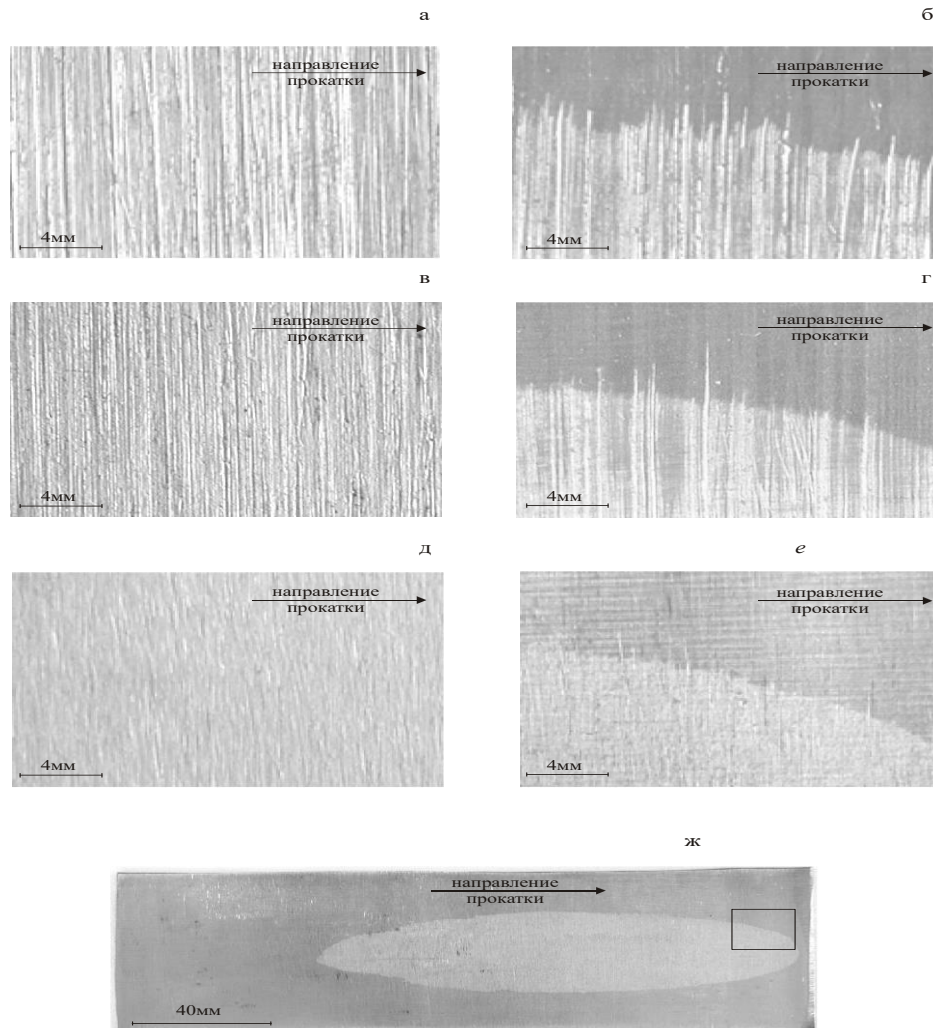
Мета цієї роботи полягала в розробленні методики оцінки переходу до режиму гідродинамічного змащення під час прокатки. Цю оцінку здійснювали шляхом вимірювання відповідності початкового і кінцевого мікрорельєфу смуги під час прокатки з технологічним мастилом. Відомо, що під час деформації шорсткої смуги без змащення у валках із гладкою поверхнею, мікрорельєф металу після деформації такий самий, як і у валків. Під час прокатування з технологічним мастилом гладкої смуги в гладких валках, мікрорельєф металу після деформації залежить від в'язкості мастила. Зі збільшенням в'язкості мастила смуга після прокатки має більш шорстку поверхню [1]. Наші досліди показали, що мастило може не тільки утворювати мікрорельєф на поверхні смуги, а й зберегти його.

4. Методи досліджень

Перед проведенням дослідної прокатки поверхню зразків обробляли наждачним папером для отримання певного мікрорельєфу: подовжнього (спрямованого вздовж бочки валків або під кутом 90° до передбачуваної осі прокатки) (рис. 1,а,в,д), поперечного (0°), а також 30° і 60° .

Після зазначеної обробки за допомогою профілографа-профілометра моделі «201» заводу «Калібр» вимірювали їхню шорсткість. Вимірювання проводили перпендикулярно напрямку мікронерівностей. Зауважимо, що подовжній мікрорельєф був приблизно однаковий по всій площі поверхні зразків. Потім для вимірювання середньої товщини масляної плівки на виході з осередку деформації ξ_1 на поверхню зразків наносили мірний об'єм мастила. Після

цього проводили дослідну прокатку в гладких валках з певним обтисненням. Мірний об'єм мастила розкочувався, утворюючи на частині поверхні зразка масляну пляму. Товщину цього шару визначали крапельним методом [4]. Важливо підкреслити, що після прокатки ділянка поверхні зразка, де не було мастила, мала шорсткість, яка приблизно дорівнювала шорсткості валків, а на тій ділянці, де перебувало мастило, мікрорельєф, у низці дослідів, практично не змінився.



а, в, д – свинець, алюміній і сталь до прокатки; *б, г, е* – прикордонна зона мастильного шару після прокатки; *ж* – пляма мастила на поверхні сталевого зразка після прокатки

Рис. 1. Мікрорельєф поверхні зразків.

На рис.1,*б,г,е,ж* наведено фотографії ділянок поверхні прокатаних зразків із поздовжнім мікрорельєфом, де чітко видно межу масляної зони, а також мікрорельєф у районі змащувального шару і в прикордонній області. Як видно з рис.1,*б,г,е* висота мікрорельєфу в області масляного шару набагато більша, ніж на прикордонній ділянці, звідси випливає, що мастильна плівка певною мірою зберігає початковий мікрорельєф поверхні зразка. Це підтверджує і профілограма шорсткості поверхні прокатаного зразка (рис. 2а). Профілограму знято з алюмінієвого зразка з напрямком мікрорельєфу під кутом 30° до осі прокатки. На ній видно, що поверхня зразка, прокатана без мастила, має незначну шорсткість, на цій ділянці має місце лише невелика хвилястість поверхні. Під час переходу через межу масляної плями (пе-

ретин А—А) шорсткість зразка значно збільшується. У зоні масляної плями через відсутність концентрацій тиску поверхневий мікрорельєф зберігся, але відбулася деформація внутрішніх шарів металу, тому на поверхні зразка утворилося заглиблення. (рис. 2б).

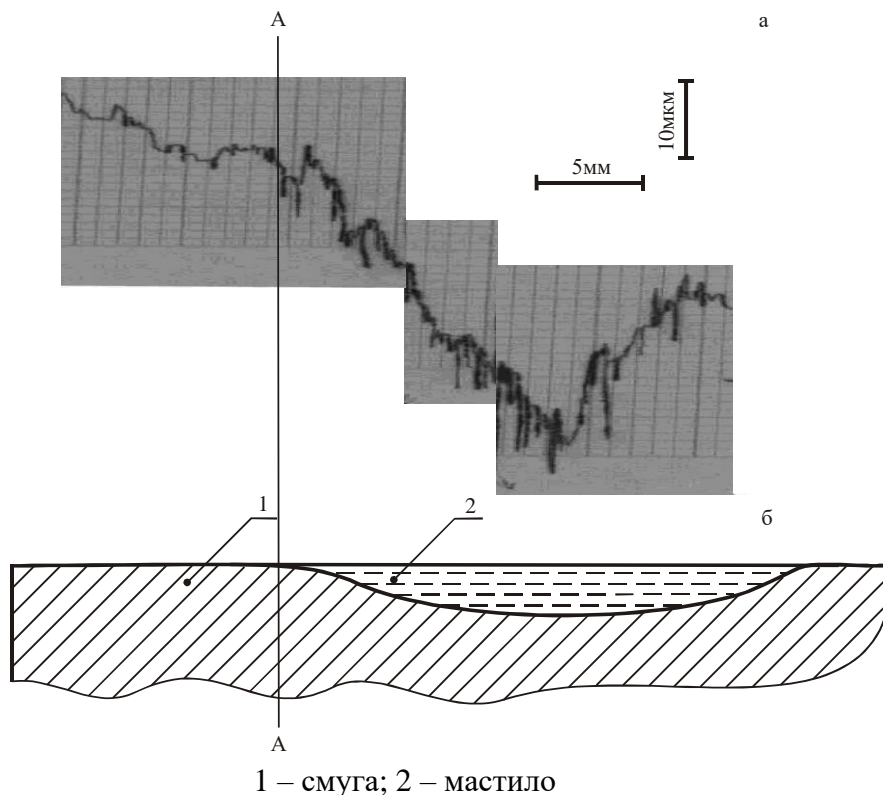


Рис. 2. Профілограма і розріз алюмінієвого зразка після прокатки.

Далі вимірювали параметри мікрорельєфу на поверхні прокатаної смуги в зоні масляної плями і порівнювали середні висоти мікронерівностей поверхні зразка до прокатки $R_{\text{знач}}$ і після деформації на ділянці масляної плівки $R_{\text{зкон}}$. При цьому враховували зменшення висоти мікронерівностей поверхні смуги, що відбувається внаслідок витяжки зразка під час прокатки (μ – коефіцієнт витяжки металу). Умова $R_{\text{знач}} \geq \mu R_{\text{зкон}}$ показує, чи змінюється мікрорельєф поверхні смуги на ділянці змащувальної плівки в процесі прокатки завдяки безпосередньому зіткненню з валком. Якщо $R_{\text{знач}} = \mu R_{\text{зкон}}$, то можна зробити висновок, що мікрорельєф смуги в осередку деформації не змінився, тобто мастильний шар ізолює поверхню валка і смуги від безпосереднього зіткнення. Умова $R_{\text{знач}} > \mu R_{\text{зкон}}$ вказує на те, що внаслідок безпосереднього контактування валок деформував мікронерівності поверхні смуги. Отже, екранування мастилом поверхонь валка і смуги не відбувалося. Умова $R_{\text{знач}} < \mu R_{\text{зкон}}$ показує, що шорсткість смуги в осередку деформації зростає. Остання умова може виконуватися тільки тоді, коли мастило утворює свій мікрорельєф. Такі умови можуть виникати тільки в разі повного розділення поверхонь, що труться, суцільним мастильним прошарком.

Підготовлені алюмінієві та свинцеві зразки ($h_0 \times b_0 \times l_0 = 2,50 \times 65 \times 160$ мм) прокатували в гладких валках ($R_{\text{зв}} = 0,8$ мкм) діаметром $D = 180$ мм на двовалковому лабораторному стані «180» при температурі цеху 18°C для зразків із поздовжнім мікрорельєфом і $15,5^\circ\text{C}$ для всіх інших зразків. Швидкість прокатки $v_{\text{в}} = 0,33$ м/с. Сталеві зразки ($h_0 \times b_0 \times l_0 = 2,00 \times 65 \times 180$ мм) прокочували в шліфованих валках ($R_{\text{зв}} = 2$ мкм) шестивалкового лабораторного стану «260» при температурах цеху 23 та 38°C . Досліди за температури 38°C дали змогу за менших

обтиснень, ніж за 23°C, отримати мале значення товщини мастильної плівки завдяки зменшенню в'язкості масла. Діаметр робочих валків стану $D_{\text{раб}} = 100 \text{ мм}$, опорних – $D_{\text{оп}} = 260 \text{ мм}$. Швидкість прокатки $v_{\text{в}} = 0,46 \text{ м/с}$. Для отримання різного значення товщини мастильної плівки використовували технологічні мастила різної в'язкості: індустріальне 20 ($\nu_{20} = 91 \text{ мм}^2/\text{с}$), МС-20 ($\nu_{20} = 722 \text{ мм}^2/\text{с}$) і касторове ($\nu_{20} = 1400 \text{ мм}^2/\text{с}$). Абсолютне обтиснення змінювали в межах 0,27 – 1,16 мм для свинцю, 0,11 – 1,07 мм для алюмінію і 0,03 – 0,28 мм для сталі.

5. Результати досліджень

Результати дослідів аналізували відповідно до описаної методики. Дані про деякі зразки наведено в табл.1. Так, під час прокатки свинцевих зразків з поздовжнім мікрорельєфом режим контактно-гідродинамічного тертя спостерігався навіть за абсолютного обтиснення 0,91 мм. На двох зразках із цієї групи під час прокатки з МС-20 мікрорельєф зберігався ($R_{\text{зкон}} \cdot \mu / R_{\text{знач}} \approx 1$), на п'яти інших - висота нерівностей збільшилася ($R_{\text{зкон}} \cdot \mu / R_{\text{знач}} > 1$), що характерно для режиму рідинного тертя. При цьому середня висота мікронерівностей зразків до прокатки становила 10-13,8 мкм, а товщина шару мастила на виході осередку деформації була значно меншою - в середньому 5 мкм. Тільки у двох випадках, під час прокатки з відносно великими обтисненнями 0,88 і 1,16 мм, спостерігався режим змішаного тертя. Але навіть у цих дослідах, за малої товщини шару мастила, відповідно 2,43 і 1,35 мкм, висота нерівностей смуги зменшувалася менш ніж удвічі. На зразках із попередньо нанесеним мікрорельєфом під кутом 60° до осі прокатки вдалося отримати режим контактно-гідродинамічного тертя за абсолютного обтискання 0,47 мм. У дослідах зі зразками, шорсткість поверхні яких спрямована під кутом 30° до осі прокатки, режим контактно-гідродинамічного тертя спостерігався за максимального абсолютного обтискання 0,32 мм.

Під час прокатки більш твердого матеріалу - алюмінію спостерігалася подібна закономірність. Можна вважати, що на зразках з поздовжнім мікрорельєфом режим контактно-гідродинамічного тертя спостерігався в трьох випадках. Максимальне абсолютне обтиснення при цьому становило 0,73 мм. На дев'яти інших зразках шорсткість поверхні зменшилася менш ніж удвічі. У групі зразків із мікронерівностями поверхні, нанесеними під кутом 60° до осі прокатки, режим контактно-гідродинамічного тертя спостерігався у всіх випадках, за винятком одного зразка з початковою шорсткістю $R_{\text{знач}} = 21,3 \text{ мкм}$, коли товщини мастильної плівки виявилось недостатньо, щоб екранувати поверхневий мікрорельєф. Для цієї групи максимальне обтиснення зразка, за якого спостерігався режим рідинного тертя, становило 0,45 мм.

Під час прокатки алюмінієвих зразків із мікронерівностями під кутом 30° до осі прокатки з обтисненням понад 0,30 мм висота мікрорельєфу зменшувалася. Для зразків із поперечним мікрорельєфом ця межа, в середньому, зменшилася до 0,22 мм, хоча один зразок із цієї групи був прокатаний у режимі контактно-гідродинамічного тертя за абсолютного обтискання 0,31 мм.

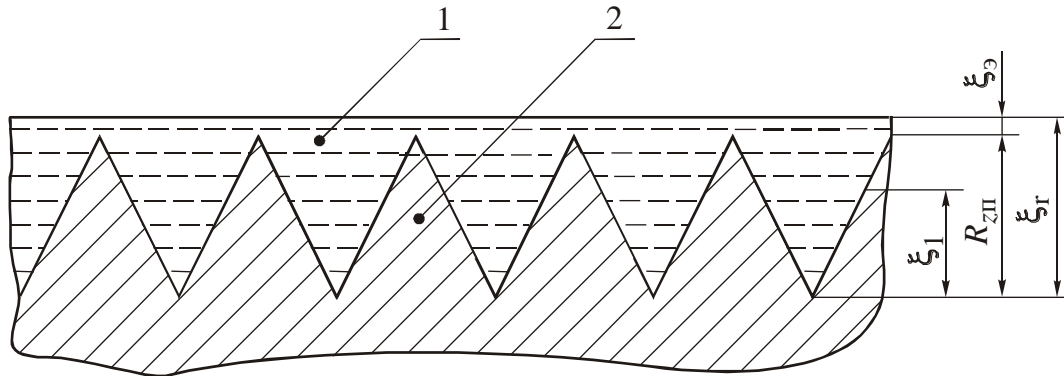
Із двадцяти сталевих зразків із поздовжнім мікрорельєфом тільки на двох висота мікронерівностей поверхні зменшилася більш ніж удвічі, а дев'ять було прокатано в режимі рідинного тертя.

Проведені дослідження показують, що мікронерівності зразка, спрямовані перпендикулярно до осі прокатки (поздовжній мікрорельєф), замикають у собі певний об'єм змащення і сприяють його надходженню в осередок деформації. Поперечний мікрорельєф, навпаки, сприяє витіканню мастила з області контакту валків і прокатуваної смуги. Чим ближче кут мікронерівностей поверхні прокатуваного металу до 90° щодо осі прокатки, тим більша кількість мастила потрапляє в осередок деформації.

Таблиця 1. Результати експерименту.

Матеріал зразку	Напрямок мікрорельєфу	Технологічне мастило	Шероховатість поверхності образця		Абсолютне обтиснення, Δh , мм	Товщина шару мастила на виході осередку деформації ξ_1 , мкм,	$\frac{R_{z1} \cdot \mu}{R_{z0}}$
			до прокатки $R_{zпоч}$, мкм	після прокатки $R_{zкін}$, мкм			
Свинець	90°	И-20	10	11,9	0,48	4,47	1,45
	90°	МС-20	13	10,7	0,91	5,07	1,25
	90°	кастор.	10	12,1	0,27	6,29	1,37
	60°	И-20	11,0	10,0	0,47	1,96	1,118
	60°	МС-20	9,0	10,0	0,36	5,62	1,309
	30°	И-20	11,6	11,5	0,32	1,69	1,145
	30°	МС-20	14,0	10,0	0,46	8,08	0,875
Алюміній	90°	И-20	10	1,45	0,58	0,95	0,189
	90°	МС-20	6	5,5	0,73	4,80	1,29
	90°	кастор.	15	8,5	0,56	5,19	0,73
	60°	МС-20	11,7	17,6	0,18	7,70	1,617
	60°	кастор.	18,7	17,2	0,45	7,38	1,12
	30°	И-20	11,9	11,3	0,17	2,28	1,016
	30°	И-20	10,5	10,8	0,36	1,05	1,199
	30°	кастор.	9,6	11,2	0,30	1,95	1,325
	0°	И-20	19,6	15,6	0,11	6,61	0,831
	0°	МС-20	10,2	11,3	0,22	3,37	1,216
	0°	кастор.	14,4	12,8	0,31	2,71	1,01
Сталь (23°С)	90°	И-20	10,5	8,17	0,14	1,36	0,84
	90°	МС-20	4	4,67	0,18	3,40	1,27
	90°	кастор.	7,42	8,00	0,28	2,41	1,24
Сталь (38°С)	90°	И-20	7,33	5,37	0,08	3,06	0,76
	90°	МС-20	4,00	5,70	0,12	2,95	1,51
	90°	кастор.	6,50	6,08	0,08	3,85	0,97

Під час прокатки зразків завжди дотримувалася закономірність - висота нерівностей профілю металу до прокатки перевищує товщину змащувальної плівки в осередку деформації. Це пояснюється таким чином. Припустимо, що мікронерівності на поверхні зразків мають форму, наведену на рис.3. Під час визначення товщини ξ_1 (рис. 3) крапельним



1 – мастило; 2 – смуга

Рис. 3 – Змащувальна плівка на поверхні смуги

методом враховується мірний об'єм мастила і площа масляної плями. Ця товщина є усередненою без урахування мікрорельєфу. За того ж об'єму мастила з урахуванням мікрорельєфу максимальна товщина мастильної плівки ξ_r може перевищувати рівень мікронерівностей і зберігати їхню форму в процесі пластичної деформації металу. Тому, навіть якщо $\xi_1 < R_{zp}$, між поверхнями, що контактують, в осередку деформації може існувати розділювальний мастильний шар товщиною ξ_3 , характерний для режиму рідинного тертя. Саме цей шар і запобігає деформації мікронерівностей поверхонь смуги. Отримані результати деякою мірою узгоджуються з позицією механіків [2]. Отже, поріг переходу до режиму рідинного тертя може бути набагато нижчим, ніж той, що відзначався в раніше проведених дослідженнях.

6. Висновки

Під час холодної прокатки режим тертя в контакті валків і смуги можна визначати, порівнюючи мікрорельєф поверхні металу до і після деформації. Проведені дослідження показали, що режим рідинного тертя під час холодної прокатки можливий і в умовах тонкоплівкового мастила.

Список літератури:

- 1) Грудев А.П., Тилик В.Т. (1975) Технологические смазки при прокатном производстве Москва: Металлургия.
- 2) Крагельский И.В., Алисин В.В. (1979) Трение, изнашивание и смазка. Справочник в 2-х кн.. Кн 2: москва: Машиностроение.
- 3) Максименко О. П., Лейко О.С. (2001) Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА.
- 4) Грудев А.П. (1973) Внешнее трение при прокатке. москва: Металлургия.
- 5) Данченко В.М., Гринкевич В.О., Головки О.М. (2008) Теорія процесів обробки металів тиском: Підручник. – Дніпропетровськ: Пороги.
- 6) Максименко О.П., Нікулін О.В., Самохвал В.М., Лобойко Д.І. (2021) Системний підхід, методи досліджень процесів прокатування з аналізом поздовжньої сталості: навчальний посібник. Кам'янське: ДДТУ.

- 7) Целиков А.И., Гришков А.И. (1970) Теория прокатки. москва: Металлургия.
- 8) Грудев А.П. (2001) Теория прокатки. (2-е перераб. и доп. изд.). москва: СП Интермет Инжиниринг.
- 9) Смирнов В.С. (1967) Теория прокатки. москва: Металлургия.
- 10) Павлов И.М. (1938) Теория прокатки и основы пластической деформации металлов. Москва: ГОНТИ.
- 11) Максименко О.П., Лейко О.Є. (2005) Основи трибології. Навчальний посібник для студентів спеціальності: Обробка металів тиском. Дніпродзержинськ: ДДТУ.
- 12) Ніколаєв В. О., Мазур В. Л. (2010) Виробництво плоского прокату : підр. Для студ. Вищ. Навч. Заклад. Запоріжжя : ЗДІА.
- 13) Васильов Я. Д., Мінаєв О.А. (2009) Теорія поздовжньої прокатки. Донецьк : УНІТЕХ.
- 14) Mizuno T. (1966) An experimental research on cold rolling. 1. Report: Estimating the mechanism of the lubrication / T. Mizuno // Japan Society of Technology of Plasticity. – № 7.
- 15) Коновалов Ю. В., Мінаєв А. А. (2012) Металургія :навчальний посібник в 3 кн. Книга 2. Металознавство та основи термічної обробки металів. Теоретичні основи обробки металів тиском. Сортамент прокатної продукції. Виготовлення заготовок, листопрокатне виробництво. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ».

ANALYSIS OF ROLLING IN THE LIQUID FRICTION MODE

Oleg Maksimenko

Department of metallurgy of ferrous metals and pressure metal processing named after prof. V.I. Loginov/
Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID ID 0000-0003-0846-9869

Anna Pryimak

Department of metallurgy of ferrous metals and pressure metal processing named after prof. V.I. Loginov/
Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID ID 0009-0009-9070-643X

Kristina Kolesnyk

Department of metallurgy of ferrous metals and pressure metal processing named after prof. V.I. Loginov/
Metallurgical Faculty, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

Abstract: The procedure of an estimation of transition to contact-hydrodynamical lubrication mode is designed at rolling proces. On a base of the received experimental datas is shown, that the lubricant course can maintain an initial microrelief of metal surface, and the threshold of transition to a mode of liquid friction can be at a bed depth of lubrication smaller, than height of unevennesses of a roll surface. Studies show that the mechanism of lubrication in the deformation focus is largely determined by the thickness of the oil layer. This thickness determines the friction regime in the contact between the rolls and the strip, which can be boundary, mixed, or contact-hydrodynamic. In some cases, when rolling relatively soft metals with a sufficiently viscous lubricant, it is close to liquid friction.

Keywords: lubricating film, metal surface microrelief, friction mode, friction coefficient, hydrodynamic parameters.
