

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

Дніпропетровський металургійний інститут

На правах рукопису

Максименко Олег Павлович

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ МАСТИЛЬНОЇ ДІЇ ПРИ  
ПРОКАТЦІ І ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ  
НА ОСНОВІ ЇЇ ЗАСТОСУВАНЬ

Спеціальність

05.16.05 - "Обробка металів тисненням"

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
доктора технічних наук

Дніпропетровськ - 1992



00825711 (O)

об 26.535

Робота виконана на кафедрі "Обробка металів тисненням" Дніпродзержинського Індустріального Інституту I на кафедрі "Обробка металів тисненням" Дніпропетровського металургійного Інституту.

Офіційні опоненти - член-кореспондент Академії технологічних наук РФ, доктор технічних наук, професор  
Колмогоров Г.Л. ;  
доктор технічних наук, професор  
Мазур В.Л. ;  
доктор технічних наук, професор  
Белосевич В.К.

Ведуче підприємство - металургійний комбінат "Запоріжсталь", м. Запоріжжя.

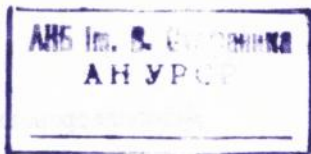
Защита відбудеться " 2 " березня "1993р. о 12<sup>30</sup> год.  
на засіданні спеціалізованої Ради Д 068.02.01 при Дніпропетровському металургійному Інституті (320635, м.Дніпропетровськ, проспект Гагаріна, 4)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського металургійного Інституту.

Автореферат розісланий " 22 " січня " 1993 р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради, доктор технічних наук, професор

Саф'ян М.М.



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Технічне переозброєння металургії в найближчій перспективі буде здійснюватися шляхом створення нових технологій і модернізації діючого устаткування. Основна увага при цьому буде приділятися інтенсифікації та піднесенню якості прокату, в першу чергу листового, частка якого в загальному сортаменті неухильно зростає. Підвищення продуктивності і довговічності устаткування, корінне поліпшення якості металу і точності геометричних розмірів, збільшення стійкості валків і зниження енергосилових параметрів прокатки тісно пов'язано з застосуванням ефективних технологічних мастил і оптимізацією тертя в зоні деформації.

Не дивлячись на значну кількість досліджень, що відносяться до процесів обробки металів тисненням з мастилом, теорія мастильної дії ще не отримала того розвитку, якого вимагає від неї практика прокатного виробництва. Залишаються не розробленими питання вибору і застосування технологічного мастила, раціонального його подачі в зону деформації, потребує уточнення і розвитку теорія утворення мастильного шару в контакті валків і смуги і теорія оптимально необхідних витрат мастила, не до кінця ще розкриті закономірності тертя при прокатці з мастилом, нема даних про поведінку мастильного шару в зоні деформації і вплив попередніх наслідків на протікання його. Всі ці питання вимагають подальшого осмислення, уточнення, наукового обґрунтування і побудови сучасної теорії, яка б враховувала усі аспекти деформації металу з мастилом. Тому проблема всебічного розвитку науки про тертя, знос і змащування в процесах обробки металів тисненням, поглиблення теорії мастильної дії, модернізації засобів подачі мастила до зони деформації є актуальною.

Мета роботи. Отримання нових наукових результатів і виявлення закономірностей мастильної дії в зоні деформації при прокатці, розробка на їх основі і запровадження у виробничу практику нових технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесу з мастилом. Відповідно до викладеної мети в дисертації висунуті і вирішені такі завдання:

1. Розробка математичної моделі механізму захоплення мастила при прокатці з врахуванням гідродинамічних параметрів, реології мастила і металу, а також пружних властивостей контактуючих поверхонь

та їх мікрорельєфу.

2. Експериментальне дослідження впливу різних параметрів і факторів на утворення мастильного шару в зоні деформації та контакті опорного і робочого валків.

3. Аналіз закономірностей тертя при прокатці з мастилом з позиції контактної-гідродинамічної теорії.

4. Дослідження поведінки і течії мастильного шару в зоні деформації, його стану після розвантаження і впливу передісторії на ефективність мастильної дії.

5. Розвиток теорії оптимально-необхідних витрат технологічного мастила.

6. Створення нових способів і пристроїв для подачі технологічного мастила і запровадження у практику листопрокатного виробництва.

Наукова новизна. Розроблено комплекс поглядів, уявлень та ідей, спрямованих на розкриття закономірностей мастильної дії і тертя при прокатці з технологічними мастилами і пояснюючих вплив різних параметрів і факторів на ефективність процесу і якість продукції.

Розроблена контактна-гідродинамічна модель механізму мастильної дії при прокатці, виявлені закономірності утворення мастильного шару в зоні деформації. Виконано експериментальні дослідження, котрі послужили основою для перевірки аналітичних залежностей розкриття нових закономірностей і врахування впливу мікрорельєфу поверхонь валків і смуги на проникнення мастила в зону контакту. Встановлено і науково обгрунтовано фактори, що визначають ефективність технологічних мастил у зоні деформації. Контактна-гідродинамічна модель стала тією основою, на якій отримала розвиток теорія оптимально-необхідних витрат мастила і методика визначення коефіцієнта тертя при холодній прокатці.

В результаті аналізу механізмів утворення мастильного шару в зоні деформації та в у важконавантаженому пружному контакті встановлено, що тертя при холодній прокатці в основному підлягає контактна-гідродинамічним закономірностям. З цих позицій пояснені відомі з практики ОМТ залежності коефіцієнта тертя від товщини мастильної плівки, швидкості скочвання, в'язкості мастила, середнього тиску і ступеня деформації.

Представлено і узагальнено результати експериментального дослідження впливу передісторії поведінки мастильного шару на його течію в зоні деформації. Зокрема проаналізовано вплив попереднього навантаження мастила на ефективність мастильної дії. Встановлено, що при цьому зростає товщина мастильної плівки в контактні валків і смуги.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень уточнено механізм мастильної дії при гарячій прокатці, розкрито вплив позаконтактної деформації металу в задній зовнішній зоні на проникнення мастила в зону деформації. Показано, що гідродинамічний ефект і характер мікрорельєфу контактних поверхонь в основному визначають товщину шару мастила при гарячій прокатці. Вивчена залежність коефіцієнта тертя від в'язкості мастила, швидкості гарячої прокатки, обтиснення і ширшавості поверхні валків.

Сукупність наукових розробок, пов'язаних з дослідженням механізму мастильної дії при прокатці уможливила запропонувати оригінальні пристрої і способи подачі технологічного мастила.

Практична цінність. Показано шляхи і запропоновано нові технічні рішення підвищення точності і поліпшення якості прокату за рахунок зменшення сил зовнішнього тертя, уповільнення зносу валків та нерівномірності їх виробленості. Знання основних закономірностей механізму мастильної дії надає можливості управляти процесом тертя при прокатці з застосуванням технологічних мастил.

Реалізація в промисловості. Основні положення розробленої теорії механізму мастильної дії використані при запровадженні технологічного мастила на безперервному тонколистовому широкошовому стані І680 гарячої прокатки комбінату "Запоріжсталь" і на товстолистовому стані І200 Дніпровського металургійного комбінату. Освоєна технологія прокатки на цих станах з застосуванням технологічного мастила.

Розроблено і впроваджено спосіб подачі мастила на опорні валки з боку виходу металу з кліті на стані І680. Розроблено і запроваджено спосіб і пристрій для подачі мастила в зону деформації на товстолистовому стані І200. Крім того, запроваджено новий пристрій для нанесення мастила на валки на листовому стані тріо Лаута заводу "Сарканайс металургс" у Литві.

Запропоновано нову економічну систему подачі технологічного

мастила з одночасним очищенням стічних вод, котра запроваджується на товстолистовому стані І200 ДМК.

Новизна технічних рішень підтверджується п'ятнадцятьма винаходами.

Загальний економічний ефект від запровадження результатів роботи складає понад 720 тис. карбованців.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідались на Всесоюзному семінарі "Досвід застосування технологічних мастил при гарячій і холодній прокатці сталі" /м.Дніпропетровськ, 1973р./, на Республіканських науково-технічних конференціях "Тертя і технологічні мастила при обробці металів тисненням" /м.Дніпропетровськ, 1971, 1975, 1985 р.р./, на Всесоюзній науково-технічній конференції "Теоретичні проблеми прокатного виробництва" /м.Дніпропетровськ, 1972, 1988 р.р./, на Всесоюзній науковій конференції "Сучасні проблеми підвищення якості металу" /м.Донецьк, 1978р./, на Спільній виїзній сесії АН України /м.Дніпропетровськ, 1975р./, на Всесоюзній науково-технічній конференції "Деформація металу в багатовалкових калібрах" /м.Магнітогорськ, 1987р./, на Всесоюзній науково-технічній конференції "Нові технологічні процеси прокатки, що інтенсифікують виробництво і підвищують якість продукції" /м.Челябінськ, 1984р./, на постійнодіючому семінарі "Тертя і змащування при обробці металів тисненням" /м.Дніпропетровськ, 1974, 1975, 1980, 1988, 1989, 1991 р.р./, на об'єднаному семінарі кафедри ДМетІ та прокатного відділу інституту чорної металургії МЧМ СРСР /м.Дніпропетровськ, 1974, 1983, 1989, 1991 р.р./.

Публікації. На тему дисертаційної роботи опубліковано 32 статті в журналах і збірниках, отримано 15 авторських свідоцтв на винаходи.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з дев'яти глав, у яких об'єднано теоретичні та експериментальні дослідження процесу прокатки з застосуванням технологічних мастил, методику і наслідки впровадження розробок у виробництво.

Дисертація містить 494 сторінки машинописного тексту, 48 таблиць, 145 рисунків. Список літератури включає 272 назви. В додатку на 69 сторінках представлено копії документів, які підтверджують використання результатів роботи в промисловості та прикла-

ди розрахунків.

Представлена робота є узагальненням наукових результатів, отриманих автором при виконанні науково-дослідних робіт у Дніпропетровському металургійному та Дніпродзержинському індустріальному інститутах з 1972 по 1991 рік.

При постановці та виконанні досліджень автор спирався на капітальні праці з теорії прокатки і теорії пластичності вітчизняних і зарубіжних вчених: С.І. Губкіна, О.І. Целікова, О.П. Чекмарьова, І.М. Павлова, П.І. Полухіна, В.Л. Колмогорова, Т. Кармана, Р. Хілла, Р. Сімса та ін.

Великий вклад в теорію тертя, мастильної дії і технологію прокатки з змащуванням внесли О.П. Грудев, М.М. Саф'ян, В.Л. Мазур, В.К. Білосевич, Г.Л. Колмогоров, А.К. Чертавський, В.П. Полухін, Я.Д. Васильов, В.Т. Тилик, Ф.Б. Долженков, Ю.В. Зільберг, В.А. Ніколаєв, В.І. Капланов, М.А. Лейченко, І.Г. Астахов, А. Надаї, М.Г. Кокрофт, Т. Судзуки, Т. Мідзуно, Л. Тот, В. Грегорі, Ш. Ченг, Дау, Кеніел, Д. Беді, Уїлсон, М. Хіллер, Мерч, В. Валовіт, К. Дюзан та ін.

В процесі роботи над дисертацією автор також використовував результати досліджень спеціалістів у галузі тертя, зносу та змащування пружного важконавантаженого контакта і, в першу чергу, публікації І.В. Крагельського, А.С. Ахматова, А.М. Ертеля, А.І. Петрусевича, Н.І. Грубіна, М.В. Коровчинського, Д.С. Кодніра, Ю.А. Розенберга, Ю.Н. Дроздова, М.Д. Генкіна, Д. Даусона, В. Вінера, М.Аппелдорна, Г. Чженя.

Питання зовнішнього тертя, змащування і механізму мастильної дії при обробці тисненням займають значне місце у працях вітчизняних і зарубіжних вчених. Короткий аналіз граничного і гідродинамічного ефектів при терті міститься у вступі та першій главі. Тут також розглянуто сучасний стан теорії тертя і висвітлено різні погляди на механізм тертя при холодній прокатці з технологічними мастилами. Недивлячись на розбіжності в трактуванні тертя, багато дослідників вважають, що процес холодної прокатки в основному ведеться в режимі змішаного тертя. Однак теорія змішаного тертя при обробці тисненням знаходиться на початковому ступені свого розвитку, в зв'язку з чим виникають істотні труднощі у виконанні технологічних розрахунків.

Однією з основних характеристик тертя є товщина шару мастила в зоні деформації. Тому в роботі проаналізовано гідродинамічну модель захоплення мастила, відзначені позитивні сторони цієї моделі і недоліки. Вона досить надійно працює в умовах малонавантаженого контакту при товстоплівковому змащуванні, наприклад, при прокатці кольорових металів з в'язкими технологічними мастилами. В реальних умовах холодної прокатки сталі ця модель дає істотне заниження порівняно з експериментальними результатами, що позначається на оцінці режиму тертя, на точності визначення оптимально-необхідних витрат мастила та інших параметрів.

Проаналізовано механізм мастильної дії при гарячій прокатці. Недивлячись на значну кількість робіт, багато питань механізму мастильної дії та зовнішнього тертя при гарячій прокатці з технологічними мастилами не отримали потрібного для практики вирішення. Зокрема не розроблені пристрої і способи для нанесення відміряної кількості мастила. Особливої уваги вимагають екологічні аспекти гарячої прокатки з змащуванням. Все це негативно позначається на якості прокату, продуктивності та собівартості.

В цій же главі розглянуто математичну задачу теорії гідродинамічного змащування і в підсумках поставлені й обґрунтовані завдання досліджень.

#### Контактно-гідродинамічна модель механізму мастильної дії при прокатці

В роботах [1,2] та інших дослідників розроблено гідродинамічну модель механізму проникнення технологічного мастила в зоні деформації. При залежності в'язкості мастила від тиску товщина мастильної плівки у входному перетині зони деформації визначається

$$\xi_{op} = \frac{3}{\frac{\alpha}{\theta \cdot \eta \cdot v_{\Sigma}} [1 - \exp(-\theta \cdot p_0)] + \frac{1}{\Delta h}} \quad /1/$$

Нехтуючи другим доданком у знаменнику, отримуємо формулу Т.Мідзуно

$$\xi_{op} = \frac{3 \eta \cdot \theta \cdot v_{\Sigma}}{\alpha \{1 - \exp[-\theta \cdot p_0]\}} \quad , \quad /1a/$$

де

$\eta$  - динамічна в'язкість мастила при заданій температурі й атмосфернім тиску;

$\theta$  - п'єзоефіцієнт в'язкості;

$v_{\Sigma} = v_B + v_0$ ,  $v_B$  і  $v_0$  - лінійна швидкість обертання валків і руху смуги перед зоною деформації;

$\alpha$  і  $\Delta h$  - кут захоплення і абсолютне обтиснення;

$p_0 = \sigma_s - \sigma_0$ ,  $\sigma_s$  і  $\sigma_0$  - вимушена границя текучості металу у вхідній зоні контакта металу з валками і задній питомий натяг.

Наведені формули якісно вірно відображають вплив основних факторів проникнення мастила в зону контакта, але вони не завжди дають задовільну кількісну оцінку товщини шару мастила в зоні деформації.

На основі аналізу розмірностей отримана більш загальна модель залучення мастила в зону деформації /3,4/

$$\frac{\xi'_0}{\Delta h} = N_1 \left[ \alpha^{-2a} \cdot \left( \frac{\eta v_{\Sigma}}{p_0 \Delta h} \right)^b \cdot (\theta p_0)^c \cdot \left( \frac{E}{p_0} \right)^d \right], \quad /2/$$

де

$N_1$  - числовий коефіцієнт;

$2a, b, c, d$  - показники степені, визначувані з досліду;

$E = \frac{1}{2}(E_B + E_n)$ ,  $E_B$  і  $E_n$  - модуль пружності першого роду матеріала валків і смуги.

При певних значеннях  $N_1$  і показників степенів ця формула включає в себе усі відомі теоретичні вирази для визначення товщини шару мастила.

В роботі отримала розвиток логічна схема контактної-гідродинамічного змащування при прокатці /5,7/, суть якої полягає в наступному. Як відомо, процесу пластичної формозміни смуги у валках передує стадія доторкання металу з інструментом і пружної деформації підкату. В результаті утворюється невелика зона пружного контакта, початком якої є перетин зустрічі смуги з валками А-А /рис. 1а/. Нехай в перетині Б-Б відбувається перехід від пружної деформації металу до пластичної, тоді тиск у цьому перетині

достигає величини вимушеної границі текучості  $\sigma_s$ . При подачі технологічного мастила в місце, що передує зоні деформації /зліва від перетину  $A-A$  /, утворюється гідродинамічний клин, виникає підймальна сила, чим відкривається доступ мастила в область пружної деформації. По довжині цієї області гідродинамічний тиск зростає, що і визначає її клиновидність. Така форма масляного зазора в пружній зоні сприяє подальшому росту гідродинамічного тиску, не-сучої здатності мастила і товщини масляної плівки на вході в область пластичної деформації металу.

Таким чином, контактнo-гідродинамічна модель змащування відрізняється від раніше запропонованої тим, що враховує гідродинамічні процеси, що протікають у пружній зоні. Як буде показано далі, при тонкоплівковому змащуванні, найбільш інтенсивно ці процеси розвиваються саме в пружній зоні.

Математична модель контактнo-гідродинамічного змащування для випадку стаціонарної, квазіізотермічної течії одномірного потоку нестисненої рідини, в'язкість якої залежить від тиску, з одного боку, визначається рівнянням Рейнольдса.

$$\frac{dK}{d\left(\frac{\varphi}{\alpha_c}\right)} = 6W \left(\frac{\Delta h}{\xi_0}\right)^2 \cdot \frac{1-H}{H^3} \cdot \exp(\theta \sigma_s K), \quad /3/$$

а з другого - виразом, що описує форму мастильного зазора,

$$\frac{\xi_x}{\xi_0} = \frac{\Delta h}{2\xi_0} \left[ \left(\frac{\varphi}{\alpha_c}\right)^2 - 1 \right] + \frac{C_1}{\Delta_1} \left[ \frac{\varphi}{\alpha_c} - (1 - \Delta_1) \right] + \frac{C}{\xi_0} \cdot \frac{\sigma_s}{E} \frac{P}{\sigma_s} + \frac{\xi_{оп}}{\xi_0}, \quad /4/$$

де

$\xi_0$  - контактнo-гідродинамічна товщина шару мастила при вході металу в пластичну зону /перетин  $B-B$  /;

$\xi_x$  - поточна товщина мастильної плівки;

$\alpha_c$  і  $\varphi$  - сплющений кут захоплення і кут, визначений величиною  $\xi_x$ ;

$C_1$  - коефіцієнт клиновидності мастильного зазора в пружній зоні;

$\Delta_1$  - відносна довжина пружної зони;

$C$  - коефіцієнт пропорціональності в залежності форми мастильного зазора від гідродинамічного тиску;

$p$  - поточний гідродинамічний тиск;

$E = 0,5 (E_B + E_n)$ ,  $E_B$  і  $E_n$  - модуль пружності першого роду матеріалу валків і смуги.

Вираз /4/ отримано на основі принципу незалежності дії сил. Перший член його враховує геометрію гідродинамічного клина в переддеформаційній зоні. Другий - форму мастильного зазора на ділянці пружної зони А-Б. Під дією гідродинамічного тиску відбувається місцева пружна деформація контактних поверхонь, вплив якої на поточну товщину шару мастила враховується третім членом. Остання складова визначає безпосередній вплив гідродинаміки на поступання мастила в зону деформації.

Параметр  $\Delta_1 = \Psi / \alpha_c$  являє собою відносну довжину пружної зони /  $\Psi$  - центральний кут, що відповідає довжині цієї зони А-Б, рис. 1/. У першому наближенні  $\Delta_1$  можна отримати з закону Гука

$$\sigma_s h_0 = 2 \delta h \cdot E_n .$$

Після незначних перетворень маємо

$$\Delta_1 \approx \frac{1}{2\varepsilon} \cdot \frac{\sigma_s}{E_n} , \quad /5/$$

де

$\varepsilon$  - степінь деформації металу;

$2\delta h$  - абсолютна пружна деформація смуги по висоті в перетині Б-Б.

Введемо рівняння /4/ деякі обмеження: якщо  $\frac{\Psi}{\alpha_c} \leq 1$ , то перший член його має перетворитися в нуль, оскільки ця складова описує геометрію переддеформаційної зони. При  $\frac{\Psi}{\alpha_c} \geq 1$  другий член виразу /4/ прийемо рівним  $C_1$ , оскільки за межами пружної області вплив цього члена на  $\xi_x$  залишається незмінним.

Позначимо  $p/\sigma_s = K$ ;  $\xi_{op}/\xi_0 = n$ ;  $\xi_x/\xi_0 = H$ . Крім того, зазначимо, що в перетині Б-Б  $\Psi/\alpha_c = 1 - \Delta_1$ , а  $H = H_0 - 1$  і  $K = K_1 = 1$ . Підставляючи ці граничні умови

в /4/, одержимо:  $\frac{C}{\xi_0} \cdot \frac{\sigma_s}{E} = 1 - n$

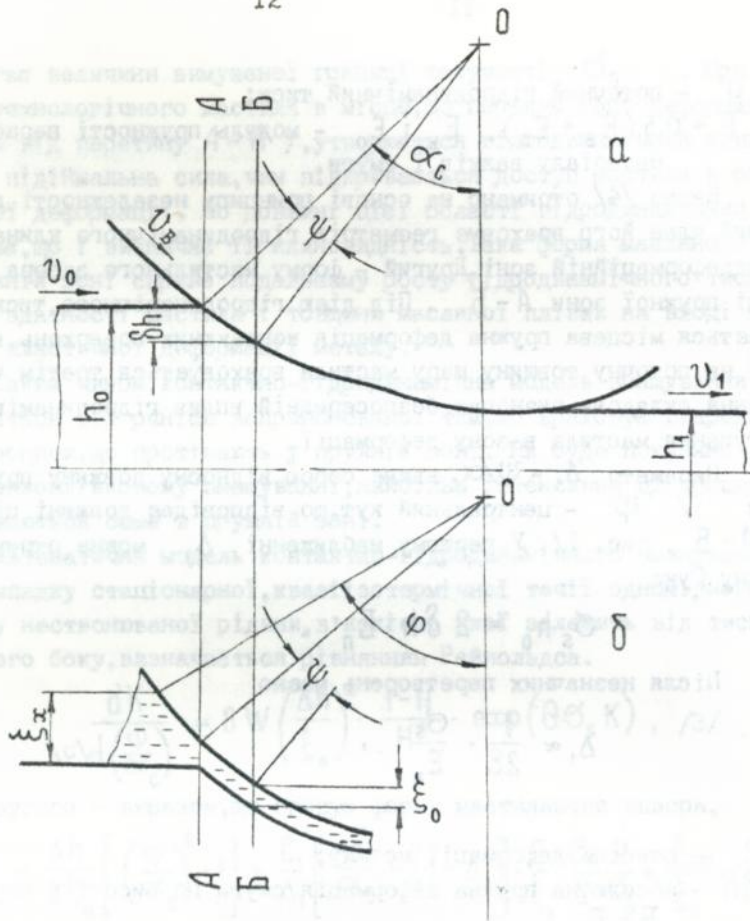


Рис.І. Схема осередку деформації і кута гідродинамічного клина.

З врахуванням останнього вираз /4/ набуває виду

$$H = \frac{\Delta h}{2\xi_0} \left[ \left( \frac{\varphi}{\alpha_c} \right)^2 - 1 \right] + \frac{C_1}{\Delta_1} \left[ \frac{\varphi}{\alpha_c} - (1 - \Delta_1) \right] + (1 - n)K + n \quad /6/$$

Зауважимо, що параметр  $W$ , який входить в /3/, визначається

$$W = \frac{\eta \cdot v_{\Sigma}}{\sigma_s \cdot \Delta h} \cdot \frac{1}{\alpha_c} \quad /7/$$

і називається комплексним гідродинамічним параметром.

При розв'язанні рівнянь /3/ і /6/ скористалися числовим методом Рунге-Кутта, вхідними параметрами служили  $W$ ,  $\theta \sigma_s$  і  $\Delta$ , результатом - значення  $\Pi$ . Розв'язання здійснювали з застосуванням ЕОМ "Іскра 10-30", для чого попередньо була складена програма. Крім зазначених вище параметрів і результату, на друк видавали поточні значення аргумента  $\varphi/\alpha_c$ , безрозмірного тиску  $K$  і похідної  $dK/d(\varphi/\alpha_c)$ .

Перш ніж перейти до аналізу результатів обчислень, необхідно дати оцінку числових значень коефіцієнта  $C_1$ . При  $C_1$ , що наближається до нуля, поточна товщина мастильної плівки по довжині пружної зони практично залишається незмінною, по її довжині не спостерігається зростання гідродинамічного тиску. В таких умовах мастильний клин А-Б, як елемент гідродинамічної системи, не виконує своїх функцій. З збільшенням  $C_1$  виникає клиновидність зазора в пружній зоні, що призводить до розвитку гідродинамічного тиску і несучої здатності. Результатом цього являється зростання  $\xi_0$ . При значному  $C_1$ , подальше його збільшення, подібно зростанню кута гідродинамічного клина, призводить до зниження швидкості руху шарів мастила в пружній зоні, до зниження несучої здатності та зменшенню  $\xi_0$ . З точки зору мінімуму витрат енергії на утворення клиновидності зазора перевагу матиме те значення  $C_1$ , при якому  $\Pi$  екстремально. В цьому випадку при заданих  $W$ ,  $\theta \sigma_s$  і  $\Delta$ , товщина  $\xi_0$  буде максимальною, а коефіцієнт тертя на ділянці А-Б мінімальним і енерговитрати на утворення клиновидності в пружній зоні будуть також мінімальними. Таким чином, значення  $C_1$  слід відшукати з умови

$$\frac{d\xi_0}{dC_1} = 0 \quad /8/$$

В результаті попередніх розрахунків було виявлено, що  $C_1$  істотно залежить від параметра  $W$ . На основі обробки даних можна рекомендувати:

при  $W \geq 5 \cdot 10^{-4}$  значення  $C_1 = 1,0$  ;  
 при  $5 \cdot 10^{-5} \leq W < 5 \cdot 10^{-4}$  -  $C_1 = 1,25$  ;  
 при  $5 \cdot 10^{-7} \leq W < 5 \cdot 10^{-5}$  -  $C_1 = 1,35$  ;

Аналіз залежності відносної товщини шару мастила від комплексного гідродинамічного параметра дозволяє оцінити, в яких умовах найбільш яскраво проявляється ефект контактної гідродинаміки. На графіках рис. 2 можна виділити три характерних ділянки. Перша ділянка - це область значних величин гідродинамічного параметра  $W > 10^{-3}$ , де пружні характеристики зближуваних поверхонь не чинять практичної дії на товщину шару мастила і тому відношення  $\xi_0 / \xi_{op}$  являється близьким до одиниці. Користуючись термінологією трибологів, цю зону можна віднести до області товстоплівкового змащування. Вона характеризується порівняно невеликими навантаженнями на гідродинамічний клин. Такі умови виникають, наприклад, при прокатці свинцю й алюмінію з в'язкими технологічними мастилами. В повній мірі ефект контактної-гідродинамічного змащування проявляється у другій зоні  $W < 10^{-4}$ , яку слід віднести до області тонкоплівкового змащування. Вона характеризується важкими умовами роботи гідродинамічної системи, високими навантаженнями, значними деформаціями контактних поверхонь. При вказаних значеннях  $W$  контактної-гідродинамічна товщина мастильної плівки істотно перевищує гідродинамічну для жорстких поверхонь  $\xi_{op}$ , відношення  $\xi_0 / \xi_{op}$  може складати  $5 + 10$  і більше. Такі умови характерні для холодної прокатки сталі та інших твердододеформованих сплавів. Третя ділянка - перехідна  $W = 10^{-3} + 10^{-4}$  тут починає проявлятися ефект контактної гідродинаміки і  $\xi_0 / \xi_{op}$  складає  $1,5 + 2,5$ . Зміна поточної товщини мастильного зазора і розподіл гідродинамічного тиску по довжині переддеформованої і пружної зон приведено на рис. 3. Аналіз кривих форми зазора показує одну спільну закономірність, пов'язану з тим, що в області, яка прилягає до перетину  $\Phi / \alpha_c = 1$ , різко змінюється клиновидність зазора. Зліва від цього перетину клиновидність визначається геометрією гідродинамічного клина, зправа - параметром  $\Delta$ . З збільшенням параметра  $\Delta$  товщина  $\xi_0$  зростає. При цьому гідродинамічний тиск найбільш інтенсивно змінюється в пружній зоні. Таким чином, при тонкоплівковому змащуванні гідродинамічні процеси в основному розвиваються у пружній зоні, вона визначає

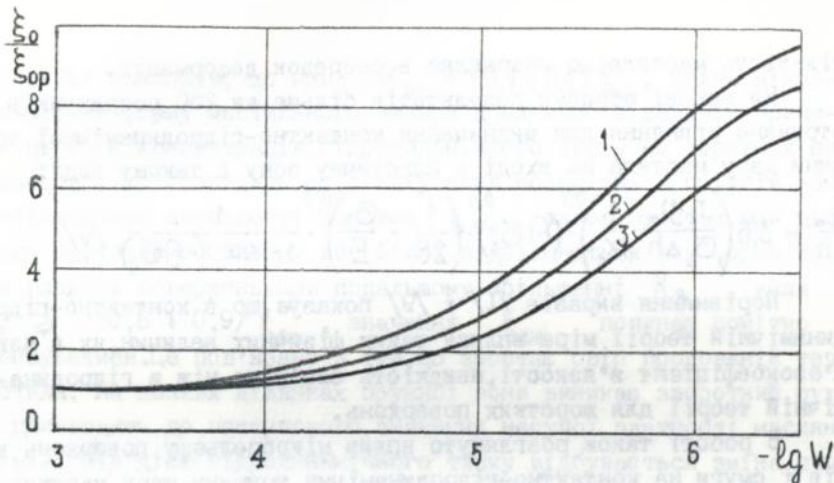


Рис. 2. Вплив комплексного гідродинамічного параметра на товщину шару мастила  
 $\Delta_1 = 0,005$ ; 1 -  $\Theta\sigma_s = 0,5$ ; 2 - 1,0 ; 3 - 2,0

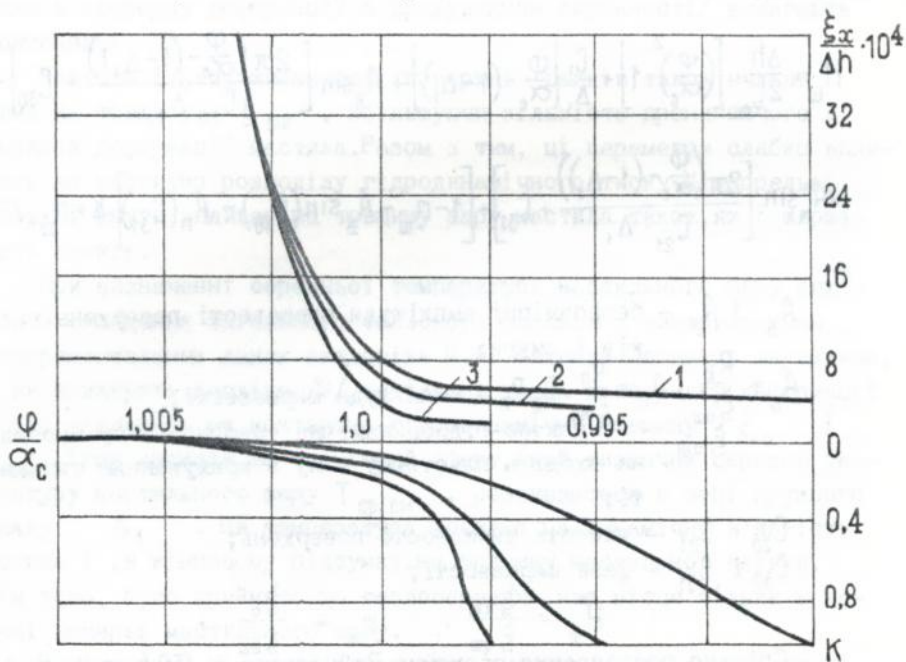


Рис. 3 Форма зазора і розподілу тиску.

$W = 10^{-5}$ ; 1 -  $\Theta\sigma_s = 3,0$ ; 2 - 2,0; 3 - 0,5

кількість мастила, що потрапляє в осередок деформації.

На основі обробки результатів більше як 250 розрахунків отримано рівняння для визначення контактної-гідродинамічної товщини шару мастила на вході в пластичну зону в такому виді:

$$\frac{\xi_0}{\Delta h} = 3,6 \left( \frac{\eta \cdot v_{\Sigma}}{\sigma_s \Delta h} \cdot \frac{1}{\alpha_c} \right)^{0,7} \cdot (\Theta \sigma_s)^{0,6} \cdot \left( \frac{1}{2\varepsilon} \cdot \frac{\sigma_s}{E} \right)^{0,3} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\Theta \sigma_s)} \quad /9/$$

Порівняння виразів /1/ і /9/ показує, що в контактній-гідродинамічній теорії міра впливу таких фізичних величин, як в'язкість, коефіцієнт в'язкості, швидкість слабкіше, ніж в гідродинамічній теорії для жорстких поверхонь.

В роботі також розглянуто вплив мікрорельєфу поверхонь валків і смуги на контактну-гідродинамічну товщину шару мастила /6/. Наближено вважали, що ширшавість обох поверхонь підлягає синусоїдальному закону. Тоді рівняння форми мастильного зазора /6/ має вид

$$H_{\omega} = \frac{\Delta h}{2\xi_{\omega}} \left[ \left( \frac{\varphi}{\alpha_c} \right)^2 - 1 \right] + \frac{C_1}{\Delta_1} \left[ \frac{\varphi}{\alpha_c} - (1 - \Delta_1) \right] + A_B \sin \left[ \frac{2\pi \left( \frac{\varphi}{\alpha_c} - (1 - \Delta_1) \right)}{C_{20} \Delta_1} + C_{30} \right] +$$

$$+ A_n \sin \left[ \frac{2\pi \left( \frac{\varphi}{\alpha_c} - (1 - \Delta_1) \right)}{C_{21} \Delta_1} + C_{31} \right] + \left[ 1 - n_{\omega} - A_B \sin(C_{30}) - A_n(C_{31}) \right] K + n_{\omega} \quad /10/$$

де

$A_B$  і  $A_n$  - безрозмірні амплітуди ширшавості поверхонь валків і смуги;

$A_B = \frac{R_B}{\xi_{\omega}} ; A_n = \frac{R_n}{\xi_{\omega}} ; R_B, R_n$  - амплітуда ширшавості;  
 $\xi_{\omega}$  - контактна-гідродинамічна товщина шару мастила на вході в пластичну зону з врахуванням ширшавості;

$C_{20}$  і  $C_{21}$  - частота ширшавості поверхонь;

$C_{30}$  і  $C_{31}$  - фаза ширшавості;

$$H_{\omega} = \frac{\xi_{\omega}}{\xi_{\omega}} ; n_{\omega} = \frac{\xi_0}{\xi_{\omega}}$$

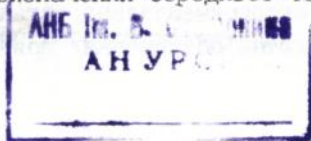
Спільне розв'язання рівняння Рейнольдса і /10/, як і раніше, здійснено відносно  $n_{\omega}$ . Результати дослідження залежності контактної-гідродинамічної товщини  $\xi_{\omega}$  від ширшавості поверх-

ні валків показали, що при  $R_B = (0,1 \div 0,4) \xi_{0ш}$ , вплив мікрорельєфу на форму мастильного зазора практично відсутній. Причиною цього є концентрація гідродинамічного тиску на вершинах нерівностей, що приводить до згладжування поверхонь в пружній зоні. З збільшенням ширшавості товщина  $\xi_{0ш}$  також зростає, при цьому форма мастильного зазору все більш відрізняється від форми його для гладких поверхонь. При подальшому збільшенні  $R_B$ , коли  $R_B \geq 10,8 \div 0,9 / \xi_{0ш}$ , значення  $\xi_{0ш}$  починає помітно зменшуватися. Це пов'язано з тим, що зростає опір продовжній течії мастила, на деяких ділянках пружної зони виникає зворотний рух її, що призводить до поступового зниження несучої здатності масляної плівки. Під дією гідродинамічного тиску відбувається зміна початкового мікрорельєфу валків, істотно зменшується віддаль між виступами і впадинами. Тому відома умова переходу до режиму рідинного тертя  $R_{zv} + R_{zp} \leq \xi_{ср.ш}$ ,  $\xi_{ср.ш}$  - середня товщина шару мастила в осередку деформації з врахуванням ширшавості/ вимагають уточнення.

Частота і фаза ширшавості поверхні валків також вчиняє вплив на товщину  $\xi_{0ш}$ , збільшуючи кількість проникаючого в осередок деформації мастила. Разом з тим, ці параметри слабко впливають на характер розподілу гідродинамічного тиску. Мікрорельєф поверхні смуги впливає на товщину шару мастила також, як і ширшавість валків.

При визначенні середньої температури мастильного шару виходили з складання загального теплового балансу з використанням експериментальних даних академіка М.А. Михеева. Спочатку зауважимо, що як показують досліді /9/, виділення тепла в осередку деформації слабко впливають на контактну-гідродинамічну товщину  $\xi_0$  і  $\xi_{0ш}$ . Тому вважали, що термічний ефект, який визначає середню температуру мастильного шару  $T_{ср.см}$ , розвивається в зоні пружного каналу  $\Delta_1$ . Ця температура впливає на динамічну в'язкість мастила і, в кінцевому підсумку, на товщину мастильної плівки. Крім того, було прийнято, що теплотапередача має місце тільки в напрямі поперек мастильного шару.

В кінцевому підсумку вираз для визначення середньої температури мастильного шару має вид:



$$T_{\text{ср.см}} = \frac{T_B + T_n}{2} + \frac{f_{\text{тн}} \cdot G_s (v_B - v_0) \frac{1}{A_T} \xi_0^{0,5} \cdot \nu^{0,17} \cdot \alpha^{0,33}}{0,94 (v_B + v_0)^{0,5} \cdot \lambda}, \quad /II/$$

де

- $T_B$  і  $T_n$  - стала температура валків і температура смуги в переддеформаційній зоні;  
 $f_{\text{тн}}$  - коефіцієнт тертя у важконавантаженому контакті, визначений з формули Д.Н. Дроздова;  
 $A_T$  - термічний еквівалент роботи;  
 $\nu$  - кінематична в'язкість мастила;  
 $\alpha$  і  $\lambda$  - коефіцієнт температуропровідності і теплопровідності мастила.

Отже, розрахунок товщини шару мастила  $\xi_0$  складається з спільного розв'язання рівнянь /9/ і /II/ з врахуванням залежності в'язкості мастила від температури і тиску.

Експериментальне дослідження впливу різних факторів на товщину мастильної плівки в осередку деформації.

В цій главі викладена оцінка відповідності розглянутої теорії експериментальним даним при двох режимах тертя в гідродинамічному клині, що характеризується товсто- і тонкоплівковим змащуванням. Проаналізовано й уточнено крапельний метод вимірювання товщини шару мастила при прокатці /10/. Розглянуто вплив геометричних і кінематичних параметрів осередка деформації, реологічних властивостей прокатуваного металу і мастила, натягу смуги, сплющування валків і мікрорельєфу контактуючих поверхонь на товщину шару мастила в контакті розкату з інструментом. Проведено дослідження впливу відхилення смуги від лінії прокатки перед входом в осередок деформації на поступання мастила в пластичну зону /II/. Встановлено, що це відхилення призводить до різної товщини шару мастила в осередку деформації з боку верхнього і нижнього валків, що може стати причиною асиметрії коефіцієнта тертя, зносу валків і сручувального моменту.

Експериментально встановлено, що збільшення кута захоплення  $\alpha$  /абсолютне обтиснення/ приводить до зниження товщини масляної

плівки в зоні деформації. Очевидно, що з збільшенням  $\alpha$  коефіцієнт тертя в осередку деформації при прокатці з технологічними мастилами має зростати.

При однаковому абсолютному обтисненні прокатування смуги у валках більшого діаметра сприяє поступанню мастила в осередок деформації. У деяких випадках збільшення діаметра валків може привести до істотного зниження сил тертя, що відіб'ється на коефіцієнті підпору /12/. Тому прийняте теорією прокатки положення про те, що з збільшенням діаметра валків збільшується контактний тиск, слід уточнити при холодній деформації металу з мастилом.

Дослідження показують, що сплющування валків істотно впливає на товщину масляної плівки в осередку деформації. При прокатці попередньо наклепаних сталевих зразків у чавунних валках товщина масляної плівки значно більша, ніж в аналогічних дослідах, але при деформації того ж металу в сталевих валках. Задній натяг смуги, збільшуючи товщину шару мастила в осередку деформації, сприяє зменшенню сил тертя у ньому. З збільшенням границі текучості прокатуваного металу кількість мастила, що потрапляє в осередок деформації гідродинамічним шляхом, зменшується. Зміна границі текучості в області його великих значень істотно не відбивається на товщину шару мастила.

Проведено експериментальне дослідження впливу висоти нерівностей поверхонь валків і смуги на товщину мастильної плівки /13/. Результати дослідів показують, що продовжня і поперечна ширшавості контактних поверхонь не однаково впливають на проникнення мастила в осередок деформації. З тієї кількості мастила, яке потрапляє в область пластичної деформації металу мікрорельєфом, основна частка припадає на продовжню ширшавість. На основі обробки експериментальних даних одержано емпіричну залежність для розрахунків товщини шару мастила, що потрапляє в осередок деформації продовжньою ширшавістю.

$$\xi_{\omega} = 6 \cdot 10^{-5} (\Sigma R_z \cdot \Delta h)^{0,85} \cdot \frac{1}{\alpha_c^{2,2} \cdot \rho_{\omega}^{0,7}}, \quad /12/$$

де

$\Sigma R_z$  - сумарна середня висота нерівностей поверхонь валків і смуги;

$\ell_{\text{ш}}$  - крок ширшавості /віддаль між сусідніми виступами/.

Тоді узагальнену модель механізму захоплення мастила можна представити

$$\xi_{\text{общ}} = \xi_0 + \xi_{\text{ш}} = 3,6 \Delta h \left( \frac{\eta v}{\sigma_s \Delta h} \cdot \frac{1}{\alpha_c} \right)^{0,7} \cdot (\theta \sigma_s)^{0,6} \cdot \left( \frac{1}{2\varepsilon} \cdot \frac{\sigma_s}{E_n} \right)^{0,3} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\theta \sigma_s)} + \frac{6 \cdot 10^{-5} (\sum R_z \Delta h)^{0,85}}{\alpha_c^{2,2} \cdot \ell_{\text{ш}}^{0,7}} \quad /13/$$

В роботі наведено зіставлення теоретичних значень товщини шару мастила з результатами промислового дослідження на жорстко-прокатувальних станах комбінату "Запоріжсталь". Частина з одержаних даних показана в табл. I. Порівнюючи експериментальні значення товщини мастильної плівки з розрахунковими, можна зробити висновок, що контактено-гідравлічна модель значно краще відображає результати промислових дослідів.

До аналізу тертя при холодній прокатці з технологічними мастилами

На основі аналітичного і експериментального дослідження механізму надходження мастила в осередок деформації в роботі проаналізовано вплив різних факторів на коефіцієнт тертя при холодній прокатці. З підвищенням в'язкості, швидкості прокатки і зменшенням кута захоплення спостерігається зростання товщини мастильної плівки в контактні валків і смуги, що має сприяти зниженню коефіцієнта тертя. Цей висновок має підтвердження в роботах О.П.Грудева, Т. Мідзуно та інших дослідників. Заслужує також експериментальної перевірки допущення про вплив діаметра валків і заднього натягу смуги на коефіцієнт тертя.

Зіставлення розрахункових формул для визначення товщини шару мастила в осередку деформації і у важконавантаженому пружному контактні показує, що механізм утворення мастильного шару в них істотно не відрізняється. Останнє дозволяє зробити допущення, що і закономірності тертя в цих контактах являються спільними. Якісний і кількісний аналіз емпіричних залежностей для визначення коефіцієнта тертя при прокатці й у важконавантаженому роликівому контактні підтверджує цю точку зору. Отже, з збільшенням

Таблиця I

## Дослідження товщини шару мастила

Номер проходу	Товщина смуги ,мм		$P_{cp}$ , МПа	$T_{cp}$ , °C	W	Товщина шару мастила			
	$h_0$	$h_1$				$\xi_{op}$	$\xi_0$	$\xi_{ш}$	$\xi_{оп}$
Стан 650									
1.	0,6	0,42	1040	115	$0,87 \cdot 10^{-5}$	0,013	0,1	0,06	0,28
2.	0,42	0,36	890	92	$0,64 \cdot 10^{-4}$	0,07	0,36	0,09	0,48
3.	0,36	0,26	1080	90	$0,37 \cdot 10^{-4}$	0,067	0,32	0,12	0,51
4.	0,26	0,25	910	77	$1,21 \cdot 10^{-3}$	0,32	0,40	0,15	0,68
Стан 550									
1.	0,6	0,5	1000	82	$0,47 \cdot 10^{-4}$	0,12	0,43	0,12	0,54
2.	0,5	0,4	995	91	$0,48 \cdot 10^{-4}$	0,125	0,45	0,12	0,56
3.	0,4	0,3	1200	95	$0,52 \cdot 10^{-4}$	0,13	0,47	0,12	0,6

Примітка:  $\xi_{оп}$  - дослідне значення товщини мастильної плівки;  
в дослідях застосовували сталені наклепані /06 кп/ зразки,  
мастило ІКС.

товщини масляної плівки, в'язкості мастила, швидкості прокатки і кочення роликів, а також швидкості сковзання в робочому діапазоні зміни її і зменшенням середньої висоти нерівностей контактуючих поверхонь коефіцієнт тертя зменшується. Сказане дозволяє зробити висновок, що при холодній прокатці сталі у валках середньої висотою нерівностей від 0,2 до 10 мкм з застосуванням технологічного мастила тертя в осередку деформації, як і у важконавантаженому контакті, підлягає контактнo-гiдродинамічним закономірностям, тобто закономірностям тонкоплівкового змащування.

З позиції контактної гiдродинаміки дано пояснення залежності питомої сили тертя /коефіцієнт тертя/ при прокатці від швидкості сковзання. При цьому слід враховувати не тільки гiдродинамічний ефект у мастильних шарах, але і термічний, пов'язаний з підвищенням температури і зниженням в'язкості масляної плівки. Крім того, проаналізовано вплив обтиснення на коефіцієнт тертя при прокатці грубошорпавої смуги у полірованих валках.

У цій же главі розглянуто розподіл товщини мастильної плівки по ширині прокатуваної смуги /14/. Вперше показано, що зміна товщини шару мастила у поперечному напрямку пов'язано з відповідним профілюванням валків, і зі зносом і місцевою висотною утяжкою метала в задній зовнішній зоні. Очевидно, що і коефіцієнт тертя у поперечному напрямку залежить від вказаних факторів. Експериментально підтверджена можливість прокатки в режимі рідинного тертя і проаналізована кінематика процесу у випадку розділення поверхонь валків і смуги суцільним мастильним прошарком.

#### Змащувальний шар в зоні контакту опорного і робочого валків

В роботі проведено дослідження утворення мастильного шару в контактi опорного і робочого валків /15/. Вперше експериментально доведено, що механізм потрапляння мастила в осередок деформації і в контакт опорного і робочого валків аналогічні. Для теоретичного визначення товщини мастильної плівки в цьому контактi можна рекомендувати формулу Д.С. Коднира.

Вивчено співвідношення товщини шару мастила в контактi валків і в осередку деформації. Дослідами показано, що товщина шару мастила в контактi валків значно більша ніж в осередку деформації

Отже, експериментальні і теоретичні дані свідчать про досить високу пропускну спроможність зони контакту робочих і опорних валків для мастила. Таким чином, додаткових втрат мастила перед входом в контактну зону валків, при розрахунках оптимально-необхідних витрат його, враховувати не слід. Проведений аналіз дозволив рекомендувати спосіб подачі мастила на багатовалкових станах /а.с. №359075/.

Вивчено зміну концентрації мастильних середовищ /емульсії, водо-масляних сумішів/ після проходження зони контакту валків. Установлено, що після виходу із цього контакту склад подаваної на валки емульсії змінюється, значно зростає процентний вміст масла в ній і в осередок деформації надходить більш ефективне мастило.

Напевно механізм підвищення концентрації масла в технологічній рідині можна пояснити дією гідродинамічного тиску на мастило в області, яка прилягає до контакту валків, що викликає її розшарування. В'язка складова рідкого середовища, що має великий опір зрушенню, залучається в контактну зону валків, утворюючи мастильний шар певної товщини. При цій товщині менш в'язке середовище буде відтіснятися із вхідної зони, оскільки її несуча здатність недостатня для подолання зовнішнього навантаження, що сприяє підвищенню концентрації масла в осередку деформації. Розшарування емульсії під дією зовнішнього навантаження необхідно враховувати при багаторазовому її використанні, бо з часом концентрація масла в рідині буде зменшуватися.

Стан мастильного шару в осередку деформації  
після розвантаження

При холодній прокатці, меншою мірою частина технологічного мастила надходить в осередок деформації, попередньо зазнаючи навантаження. Під дією тиску динамічна в'язкість істотно зростає. Отже, можна сподіватися, що на виході із зони пластичної деформації в'язкість мастила буде істотно відрізнятися від початкової. Для підвищення ефективності мастильної дії в осередку деформації важливо знати наскільки інерційний процес відновлення реологічних властивостей мастила після розвантаження. Таку оцінку можна одержати, аналізуючи течію мастильного шару на смузі після прокатки. Спеціальними дослідженнями показано, що після виходу з осередку дефор-

мації масляна плівка не знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. Через деякий час після прокатки /1 + 5 хв. і більше, в залежності від початкової в'язкості мастила, його товщини, тиску і температури/ виникає течія плівки на смузі. В цей момент сили тяжіння, капілярні сили, сили поверхневого натягу починають переважати над в'язкісними, що викликає рух шарів мастила. Результати дослідів свідчать, що в'язкість мастила не миттєво після зняття навантаження відновлюється до початкового значення, а через певний час. Запізнювання у відновленні реологічних властивостей технологічного мастила передбачається використовувати в практичних цілях, для підвищення ефективності мастильної дії в осередку деформації. Для підтвердження викладеного були проведені досліді з метою визначення товщини масляної плівки в осередку деформації у випадку застосування попередньо обробленого мастила і звичайного. Результати показали що попереднє навантаження мастила сприяє більш інтенсивному надходженню в осередок деформації порівняно з звичайними умовами подачі. Товщина попередньо обробленого мастила в 1,3 + 1,4 раза більше, ніж звичайної. Аналогічні досліді були поставлені і при дослідженні товщини мастильної плівки в контакті опорного і робочого валків. Одержані результати підтвердили повше викладений висновок.

Необхідно також зазначити, що попереднє навантаження мастила утруднює змивання його з поверхні валків, чим скорочуються непродуктивні витрати мастила.

Проведене дослідження дозволило запропонувати новий спосіб подачі мастила при прокатці з попередньою обробкою його тиском /а.с. №1151 338/.

Теоретично вплив попереднього навантаження мастила на ефективність мастильної дії в осередку деформації можна пояснити тим, що під дією значних тисків масляний шар переходить в міцелярний стан /теорія К.С.Рамайя/. Завдяки міцелярній структурі мастильна плівка знаходиться в особливому агрегатному стані, подібному до стану переохолодженої рідини. Взаємне притягування міцел, їх тимчасове об'єднання визначають різкий ріст в'язкості мастила під тиском. Після розвантаження мастильного шару поступово руйнуються міцели, втрачається взаємодія між ними, знижується в'язкість. Через деякий час мастильна плівка набуває молекулярну в'язкість

зумовлену взаємодією молекул, а не міцел. Слід підкреслити, що цей час іноді складає десятки хвилин, в деяких випадках мастило під тиском навіть може безповоротно затвердіти. При подачі в осередок деформації мастила підвищеної в'язкості зростає товщина масляної плівки в ній і зменшується коефіцієнт тертя. Цим і зумовлений ефект мастильної дії від попереднього навантаження масляного шару.

Проведений аналіз також показує, що при холодній високошвидкісній прокатці навряд чи можливий процес кристалізації /затвердіння/ мастила в осередку деформації через високі температури в ній. Ймовірність затвердіння мастила в контактній опорної і робочого валків досить велика, особливо в умовах прокатки наклепаної сталі та важкодеформовуваних сплавів.

#### Дослідження механізму мастильної дії при гарячій прокатці

Викладено результати дослідження товщини масляної плівки і коефіцієнта тертя при гарячій прокатці. Спеціальними дослідженнями /16/ показано, що технологічне мастило після проходження осередка деформації зберігається на поверхні валків. З збільшенням початкової в'язкості велика кількість масла залишається на поверхні інструменту. Залежність товщини мастильної плівки від в'язкості для мінеральних масел має більш крутий характер ніж для рослинних. Застосування при гарячій прокатці масел рослинного походження сприяє утворенню більш товстого мастильного шару в осередку деформації /17/.

Проаналізовано вплив температури поверхні валків на товщину масляної плівки при гарячій прокатці сталі. З збільшенням цієї температури товщина мастильного шару в осередку деформації зменшується. Отже, умови охолодження валків відбиваються на проникненні мастила в контактну зону валків і смуги, а також на коефіцієнт тертя.

Крім того проведені дослідження підтверджують існування складової механізму захоплення мастила при гарячій прокатці, тобто ефект мастильної дії також, як і при холодній деформації металу, залежить від товщини масляного прошарку в осередку деформації.

Вивчено вплив мікрорельєфу поверхонь тертя на проникнення

технологічного мастила в контактну зону валків і смуги /18/. Закономірності утворення масляного шару мікрорельєфом, в основному, такі, як і при холодній прокатці. Так, з збільшенням продовжньої ширшавості поверхонь валків і смуги товщина шару мастила при гарячій прокатці зростає. Однак зростання поперечної ширшавості смуги призводить до зменшення товщини масляної плівки в осередку деформації.

На основі проведеного дослідження можна зробити висновок, що і при гарячій прокатці механізм надходження технологічного мастила в осередок деформації включає механічну, гідродинамічну й адсорбційну складові.

Вперше досліджено вплив позаконтактної деформації металу на товщину шару мастила при товстостістовій прокатці. При деформації металу в цих умовах кут гідродинамічного клина істотно відрізняється від геометричного з причини позаконтактної деформації смуги в задній зовнішній зоні. Природньо завбачити, що характер позаконтактної деформації металу впливає на товщину мастильної плівки в осередку деформації.

В роботі показано, що довжина задньої зони позаконтактної деформації може в певній мірі характеризувати зміну кута гідродинамічного клина за рахунок висотного утягування смуги. Виходячи з рішення плоскої задачі пластичності з застосуванням сплайнів /20,21/ були одержані рівняння для визначення напруженого стану металу, а з граничних умов знайдено вираз для розрахунків цієї довжини /22/. На довжину задньої позаконтактної зони основний вплив справляє параметр форми  $l_d/h_{cp}$ , відносно обтиснення і умови тертя на контакті впливають слабо. Отже, залежність товщини шару мастила від характеру позаконтактної деформації металу в першому наближенні може бути врахована параметром форми  $l_d/h_{cp}$  /23/.

При зменшенні цього параметра товщина масляної плівки зростає, найбільш інтенсивно ця залежність проявляється в області, де  $l_d/h_{cp} < 1$ , хоч вона спостерігається і далі до значення  $l_d/h_{cp} = 2$ .

Таким чином, при товстостістовій прокатці наявні додаткові резерви, які сприяють захопленню технологічного мастила в контак-

тну зону валків і смуги. Це дослідження має особливе значення при подачі мастила на вертикальні валки листових станів.

За участю автора було проведено експериментальне дослідження впливу ширшавості поверхонь валків і смуги на умови тертя при гарячій прокатці з мастилом /19/. Вплив продовжньої ширшавості смуги на величину коефіцієнта тертя незначне, поперчна ширшавість її дещо ужорсточує умови тертя на контактї. В усіх випадках збільшення ширшавості поверхні валків призводить до зростання коефіцієнта тертя. Обтиснення металу і початкова в'язкість мастила досить слабо впливають на характер тертя в осередку деформації.

#### Практичне застосування результатів дослідження

На основі теоретичного та експериментального дослідження механізму потрапляння технологічного мастила в осередок деформації розроблено метод визначення контактної-гідродинамічної товщини шару мастила. Розглянуто приклади розрахунків товщини мастильної плівки при холодній прокатці на промислових станах.

Розробка контактної-гідродинамічної моделі мастильної дії дозволила удосконалити теорію розрахунків оптимально-необхідних витрат технологічного мастила. Переходячи до товщини шару мастила на початку пластичної зони, формула для визначення корисних витрат мастила в  $i$ -ній клітї має вид:

$$\Theta = 2g_{см} \cdot l_{0i} \cdot b \left\{ \xi_{0ш_i} \left( 1 - \frac{1+\mu_i}{2\mu_i} \cdot \frac{1}{1+\frac{1}{K_{P_i}}} \right) - N \xi_{0ш_{i-1}} \cdot \frac{1+\mu_{i-1}}{2\mu_{i-1}} \cdot \frac{1}{1+K_{P_{i-1}}} \right\} K_u, \quad /14/$$

- де
- $g_{см}$  - питома вага мастила;
  - $l_0$  і  $b$  - початкова довжина і ширина смуги;
  - $\mu$  - коефіцієнт витягування металу;
  - $K_P$  - коефіцієнт розподілу мастила між валком і смугою на виході із осередка деформації, в розрахунках приймали  $K_P = 1$ ;
  - $N$  - коефіцієнт при визначенні витрат мастила у першій клітї  $N = 0$ , в решті  $N = 1$ ;
  - $K_u$  - коефіцієнт лишку мастила, приймали  $K_u = 2$ .

В роботі наведено приклади розрахунків оптимально-необхідних витрат технологічного мастила для жорсткопрокатних станів комбінату "Запоріжсталь". Сумарні витрати мастила для реверсивного стана 550 склали 270 г/т, а для безперервного чотирьохкільцевого - 650 - 330 г/т. Зазначимо, що при дослідній прокатці жерсті на стані 650 кількість подаваного мастила зменшували з 1700 г/т до 386 г/т, при цьому зростання навантажень на валки і двигуни не спостерігалось /25/. Результати розрахунків також показали, що в окремих проходах /клітках/ мастило можна не подавати. Достатньо того шару, який знаходиться на смузі перед прокаткою в одній клітці.

Спираючись на дослідження О.П.Грудева і закономірності утворення мастильного шару, в роботі також запропонована формула для розрахунків коефіцієнта тертя при холодній прокатці. Ефективність застосування технологічних мастил в процесах обробки тисненням багато в чому визначається способом нанесення рідини на валки і конструкцією пристрою забезпечуючого це нанесення. З метою полегшити режим тертя в контактній зоні опорного і робочого валків, поліпшити технологічні властивості мастила і зменшити його витрати, запропоновано мастило подавати таким способом, щоб воно перед проникненням в зону деформації пройшло контакт валків. Запропонований спосіб подачі мастила /37/ має ряд переваг порівняно з уже відомими. Його запровадили на безперервному широкосмуговому тонколистовому стані 1680 гарячої прокатки /15/. Цей спосіб знайшов також застосування і на інших станах, які мають клітці кварто.

Ефект попереднього навантаження технологічного мастила використано у винаході /40/. З метою зниження непродуктивних витрат мастила, підвищення його ефективності в осередку деформації запропоновано попередньо мастильний шар обробляти тиском  $5 \pm 100$  МПа. При навантаженні мастила тиском зростає його в'язкість, підвищується адгезія до поверхні валків, що в певній мірі перешкоджає змиванню мастила з поверхні робочого інструменту охолоджуючою водою. Крім того, опізнювання відновлення реологічних властивостей при розвантаженні збільшує товщину мастильної плівки в осередку деформації. Запропонований спосіб змащування при прокатці запроваджено на товстолістовому стані 1200 Дніпровського металургійного комбінату.

З метою скорочення непродуктивних витрат мастила і регулювання товщини масляного шару на поверхні валків запропоновано контак-

тний пристрій для подачі мастила /33/, з елементом, який регулює величину кута гідродинамічного клина. Цей пристрій пройшов промислові випробування в умовах чистовідкритті середньосортного стану 550 металургійного заводу ім. Петровського /28/.

При активній участі автора була розроблена ще одна конструкція контактного пристрою для подачі мастила, який в складі має планку з конфігурацією профіля валка /42/. Пристрій забезпечує рівномірність нанесення мастила по довжині робочого інструменту і здатний обробляти поверхню валка, знижуючи нерівномірність виробленості. Він запроваджений на товстолистовому стані 1200 ДМК. Характерною особливістю наступного пристрою /34/ являє собою наявність пустотілої камери, притиснутої до поверхні валка своєю відкритою стороною і обладнаної форсунками, котрі розпилюють точно визначену кількість мастила внутрі камери, скорочуючи непродуктивні витрати мастила. Пристрій було запроваджено на листовому стані тріо Лаута заводу "Сарканайс металургс".

Хоч промислові випробування і вже накопичений виробничий досвід свідчать, що додаткове забруднення стічних вод технологічним мастилом дуже мале. Однак сам факт можливості додаткового забруднення часто являється бар'єром для широкого застосування мастила при гарячій прокатці. Тому запропонована нова економічна, екологічно чиста система подачі мастила при гарячій прокатці /44/, котра суміщує функції очищення поверхневих шарів стічних вод цехового басейну від масла з одночасною подачею утилізованого масляного середовища в осередку деформації як технологічного мастила. Замкнуте коло послідовно з'єднаних цехового відстійника, механізмів вловлювання і відсмоктування водомасляної суміші і магістралі, на якій відбувається рух масляного туману, являють собою циркуляційну, автономну систему подачі технологічного мастила при гарячій прокатці. Система частково запроваджена на товстолистовому стані 1200 ДМК.

Представлено результати експериментального дослідження процесу гарячої прокатки сталі з застосуванням технологічних масстил в промислових умовах. На безперервному ширококутовому стані 1680 вперше у вітчизняній практиці при гарячій прокатці листа з активною участю автора була виготовлена і пройшла широкі промислові випробування і запроваджена у виробництво система подачі

технологічного мастила /25/. Як мастило на першому етапі застосували емульсію полімерізованого бавовняного масла, потім - емульсії мінеральних масел, а також масла в чистім вигляді. Найкращі результати одержано у випадку застосування полімерізованого бавовняного масла в чистому вигляді. Мастило подається в зону деформації тільки в процесі прокатки металу. Вмикання і вимикання подачі рідини відбувається автоматично /27/. Із досліджених засобів і пристроїв для подачі мастила /28/ перевагу було віддано нанесенню мастильного шару на поверхню опорних валків з боку виходу металу із кліті /37/. З застосуванням мастила при гарячій прокатці знижуються енергосилові параметри деформації, зменшується знос робочих і опорних валків, підвищується якість їх поверхні, що дозволило збільшити тривалість кампанії робочих валків і прокатувати між перевалюваннями замість 2600 до 3600 т металу /26, 29, 30/.

Останніми роками технологічне змащування набуває поширення і при прокатці на товстолістових і в чорнових клітях тонколистових станів. Під керівництвом автора на товстолістовому стані 1200 ДМК була запроваджена технологія прокатки з застосуванням змащування. Після серії лабораторних і промислових випробувань було запропоновано вищеописаний спосіб /40/ і пристрій /42/ для подачі технологічного мастила. З метою скорочення непродуктивних витрат мастила і підвищення швидкодіяння системи в неї було вміщено струменевий насос з електромагнітним клапаном, котрі монтувалися в безпосередній близькості від валків. Як технологічне мастило використовували масляний туман /основа - вискозин/, зрошений водою, що відвертає опад масла на стінки трубопроводів.

Ефективність застосування мастила на стані 1200 оцінювали по зниженню виробленості валків і навантаження на головний привід. При прокатці з змащуванням величина зносу на 30 + 40% нижче порівняно з звичайними умовами деформації, спостерігалось також зменшення струму опорного кола двигуна на 6 + 10%. Застосування мастила дозволило також скоротити число проходів з І3 до І1 при виробництві листів кінцевою товщиною 7 - 8 мм. Розробки автора були використані при запровадженні технологічного мастила на листовому стані тріо Лаута заводу "Сарканайс металургс" /31, 34/.

## Нідсумки

1. На основі виконаних автором теоретичних і експериментальних досліджень отримала подальший розвиток теорія мастильної дії при прокатці. Розроблено контактнo-гiдродинамiчну модель механiзму протiкання мастила в осередок деформацiї. Проаналiзовано режими мастильної дiї при холоднiй прокатцi, показано, що процес може проходити в умовах товстоплiвкового, перехiдного i тонкоплiвкового змащування. Холодна прокатка сталi та iнших важкодеформованих сплавiв практично завжди проходить в умовах важконавантаженого контакту при тонкоплiвковому змащуваннi, коли на товщину мастильного шару в осередку деформацiї вирiшальне значення вiдiграє пружна деформацiя контактних поверхонь. Вперше проаналiзовано залежнiсть форми мастильного зазора i гiдродинамiчного тиску вiд довжини пружноi зони.

2. Розв'язано контактнo-гiдравлiчну задачу з врахуванням мiкрорельєфу поверхонь тертя. Встановлено, що вплив висоти нерiвностей на товщину шару мастила має складний характер. Спочатку з збiльшенням ширшавостi контактнo-гiдравлiчна товщина також зростає. Однак при висотi нерiвностей, що мало вiдрiзняються вiд товщини масляної плiвки, подальше зростання цiєї висоти призводить до поступового затухання гiдродинамiчного ефекту i зменшенню товщини мастильної плiвки.

3. Проведено всебiчне експериментальне дослідження механiзму захоплення мастила. Дослiдами встановлено, що товщина шару мастила в осередку деформацiї залежить вiд кута захоплення, дiаметра валкiв, сплюснення їх, реологiчних властивостей мастила i прокатуваного металу, кiнематичних умов, натягу смуги, а також вiд мiкрорельєфу поверхонь тертя i не залежить вiд теплових i силових умов осередка деформацiї. Результати порiвняння дослiдних значень товщини мастильної плiвки з теоретично розрахованими показують, що при холоднiй прокатцi сталi контактнo-гiдродинамiчна модель краще вiдповiдає експериментальним даним порiвняно з гiдродинамiчною для жорстких поверхонь.

Вперше експериментально встановлено, що вiдхилення заднього кiнця смуги вiд лiнii прокатки призводить до рiзницi геометричних умов проходження мастила в осередок деформацiї з боку верх-

нього і нижнього валків. В результаті на цих поверхнях утворюється масляний шар різної товщини, що викликає асиметрію сил тертя відносно лінії прокатки і неоднаковий знос валків.

Досліджено розподіл товщини мастильної плівки по ширині прокатуваних смуг. Показано, що характер цього розподілу істотно залежить від профіля валків, зносу їх поверхні та місцевої поза-контактної деформації металу.

4. На основі зіставлення механізмів проходження мастила в осередок деформації і у важконавантажений пружний контакт показано, що тертя при холодній прокатці з змащуванням, в основному підлягає контактній-гідродинамічним закономірностям. З позицій контактної гідродинаміки проаналізована залежність питомої сили тертя від швидкості скочвання.

5. Експериментально встановлено, що в певних умовах прокатки з в'язкими мастилами в осередку деформації можливий режим рідинного тертя.

6. Досліджено умови утворення мастильного шару в контактній опорній і робочій зонах валків. Показано, що товщина шару мастила в зоні контакту валків значно більша, ніж в осередку деформації /при однаковій силі прокатки/. Відносно товстий шар мастила в контактній зоні пояснюється більш благоприємними геометричними умовами захоплення мастила. На цій основі запропоновано спосіб подачі технологічного мастила на чотирьохвалкових станах з боку виходу металу із кліті.

7. Вперше експериментально встановлено, що після виходу із осередка деформації мастильний шар на поверхні смуги /валків/ не знаходиться в стані термодинамічної рівноваги. Це пов'язано з тим, що фізичні властивості мастила не в одну мить відновлюються до початкового значення після розвантаження. Явище запізнення у відновленні в'язкості мастила може бути використано для збільшення товщини мастильної плівки в осередку деформації, що вперше експериментально підтверджено і реалізовано на промисловому стані.

8. Спеціальними дослідженнями встановлено, що ефект мастильної дії при гарячій прокатці визначається товщиною мастильної плівки. Підтверджено вплив гідродинамічних параметрів на проходження

мастила в осередок деформації при гарячій прокатці. Показано, що температура поверхні валка істотно впливає на товщину масляної плівки. Для підвищення ефективності мастильної дії необхідно знижати температуру поверхні валків у переддеформаційній зоні.

9. Вперше експериментально і теоретично показано вплив позаконтактної деформації металу на товщину шару мастила в осередку деформації, а також на розподіл його по ширині прокатуваної смуги. Таким чином, при товстолістовій прокатці наявні додаткові резерви, які сприяють захопленню технологічного мастила в контактну зону валків і смуги.

10. Проведено комплексне дослідження впливу мікрорельєфа поверхонь валків і смуги на механізм захоплення мастила при гарячій прокатці. З збільшенням продовжньої ширшавості товщина мастильної плівки в осередку деформації зростає, а з зростанням поперечної - зменшується.

11. На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено на рівні винаходів одинадцять способів і пристроїв для подачі технологічного мастила, чотири з яких запроваджені на промислових станах. З участю автора на комінатах "Запоріжсталь", ДМК, а також на металургійних заводах ім. Петровського і "Сарканайс металург" запроваджена технологія гарячої прокатки з змащуванням.

Запропонована і частково запроваджена на товстолістовому стані I200 ДМК нова економічна, екологічно чиста система подачі технологічного мастила.

Основні положення дисертації опубліковані в таких роботах

1. Грудев О.П., Максименко О.П. Елементи гідродинамічної теорії змащування при прокатці // Вісті вузів. Чорна металургія. - 1971. - №7. - С. 105-109.
2. Грудев О.П., Максименко О.П. Дослідження умов проходження мастила в осередок деформації при прокатці // Обробка металів тисненням: Зб. наук. пр. / ДМет. М.: Металургія, 1971. - Вип. 57. - С. 209-221.
3. Максименко О.П. Застосування аналізу розмірностей в дослідженні товщини мастильної плівки // Теорія і практика тонколістової прокатки: Зб. наук. пр. / ВПІ і ЛПІ. - Воронеж, 1989. - С. 25-32.

4. Максименко О.П., Самохвал В.М. Дослідження механізму захоплення мастила при прокатці з застосуванням планування експерименту.-Дніпродзержинськ, 1980.-16с.-Деп. в Укр НДІНТІ №915-80.
5. Максименко О.П. Елементи контактної гідродинаміки в дослідженні товщини мастильної плівки при прокатці //Вісті вузів. Чорна металургія.-1991.-№2.-С.23-26.
6. Максименко О.П. Застосування контактної гідродинаміки в дослідженні механізму мастильної дії при прокатці//Проблеми металургійного виробництва:Зб.наук. пр./ДіТІ.Київ:Техніка,1990.-Вип.103.-С.24-28.
7. Максименко О.П. Елементи контактної гідродинаміки при прокатці// Наука виробництву:Зб. наук.пр./ДІТІ.Київ:Вища школа,1991.-С.33-36.
8. Максименко О.П., Хмиров О.В. Дослідження механізму змащувальної дії при прокатці з застосуванням елементів контактної гідродинаміки.-Дніпродзержинськ,1988.-6с.-Деп.в Укр НДІНТІ.-№2404-88.
9. Максименко О.П., Іванов К.О., Розмахін О.Д. Вплив умов в осередку деформації на товщину шару мастила при прокатці//Металургія і коксохімія.-Київ:Техніка,1983.-Вип.80.-С.89-91.
- 10.Грудєв О.П., Лега Л.С., Максименко О.П. Крапельний метод визначення товщини шару мастила при прокатці//Металургія і коксохімія.-Київ:Техніка,1971.Вип.46.-С.89-92.
- 11.Про вплив геометричних умов на захоплення мастила смугою і прокатними валками/ О.П.Грудєв, Ю.В.Сигалов, О.П.Максименко та ін.//Вісті вузів.Чорна металургія.-1971.-№3.-С.107-111.
- 12.Максименко О.П., Бондаренко В.А. До питання про вплив діаметра валків на тиск при холодній прокатці//Металургія і коксохімія.-Київ:Техніка,1979.-Вип.60.-С.63-65.
- 13.Вплив мікронерівностей поверхонь валків і смуги на формування мастильного шару в осередку деформації при прокатці/ О.П.Грудєв, О.П.Максименко, А.М.Должанський та ін.//Обробка металів тисненням:Зб.наук.пр./ДіТІ.М.:Металургія,1976.-Вип.59.-С.198-205.
- 14.Грудєв О.П., Максименко О.П., Іванов К.О.Розподіл товщини шару мастила по ширині смуги при прокатці//Металургія і коксохімія.-Київ:Техніка,1975.-Вип.46.-С.68-72.

15. Чекмарьов О.П., Грудев О.П., Максименко О.П. Мاستило контактної зони робочого і опорного валків//Сталь.-1975.-№1.-С.57-60.
16. Максименко О.П., Іванов К.О., Левченко Г.В. Збереження мاستила при гарячій прокатці сталі//Металургія і коксохімія. Київ: Техніка, 1974.-Вип. 41.-С.124-126.
17. Іванов К.О., Максименко О.П. Вплив температурних умов на товщину шару мاستила при гарячій прокатці// Обробка металів тисненням: Зб. наук. пр./ДітІ.М.:Металургія, 1976.-Вип. 59.-С.218-221.
18. Іванов К.О., Максименко О.П. Вплив мікрорельєфу поверхонь валків і смуги на товщину шару мастила при гарячій прокатці// Вісті вузів. Чорна металургія.-1975.-№12.-С.63-66.
19. Іванов К.О., Максименко О.П., Бондаренко В.О. Діячі закономірності тертя при гарячій прокатці//Обробка металів тисненням: Зб. наук. пр./ДітІ.М.:Металургія, 1976.-Вип. 59.-С.186-196.
20. Максименко О.П. Дослідження напруженого стану при товстостісовій прокатці з застосуванням сплайнів// Удосконалення технології прокатки, термообробки і опорядження товстостісового прокату: Зб. наук. пр./ДОН НДІ Чормет і МЧМ СРСР.М.: Металургія, 1967.-С.66-70.
21. Максименко О.П. Дослідження напруженого стану метала при прокатці з застосуванням сплайнів.-Дніпродзержинськ, 1966.-Ісб.-Деп. в Укр НДІНТІ.-№2612-65.
22. Максименко О.П., Самохвал В.М. Теоретичне дослідження задньої позаконтактної зони деформації при прокатці//Металургія і коксохімія.-Київ:Техніка, 1987.-Вип. 94.-С.30-34.
23. Максименко О.П. До механізму мастильної дії при товстостісовій прокатці//Вісті вузів. Чорна металургія.-1969.-№10:С.38-41.
24. Максименко О.П. Про граничну величину питомних сил тертя// Наука виробництву:Зб. наук. пр./ДітІ.Київ:Вища школа, 1991.-С.48-51.
25. Пошуки і освоєння нових технологічних мастил, визначення оптимальних витрат мастила і вдосконалення технології прокатки жерсті/О.П.Грудев, Ю.В.Сигалов, О.П.Максименко, В.Т.Тилик та ін.// Реф. інф. про закін. наук.- досл.роботах у вузах УРСР.Металургійна промисловість.Київ:Вища школа, 1974.-Вип.4.-75с.

26. Застосування технологічного мастила на безперервному тонколистовому стані гарячої прокатки /В.Г.Дрдока, О.П.Грудєв, В.Т.Тилик, О.П.Максименко // Сталь. - 1974. - №1. - С.47-50.
27. Автоматизація подачі технологічного мастила на безперервному тонколистовому стані гарячої прокатки /О.П.Чекмарьов, О.П.Грудєв, О.П.Максименко та ін. // Бюлетень ЦНДІЧМ і Б.І. - 1974. - №19. - 2Іс.
28. Грудєв О.П., Максименко О.П., Іванов К.О. Промислові випробування пристроїв для подачі технологічного мастила при гарячій прокатці сталі // Металургія і коксохімія. - Київ: Техніка, 1974. - Вип. 4І. - С.38-4І.
29. Дослідження ефективності застосування технологічних мастил при гарячій прокатці сортової і тонколистової сталі, пошуки і освоєння нових мастил при холодній прокатці жерсті /О.П.Грудєв, Ю.Б.Сигалов, О.П.Максименко та ін. // Реф.інф. про закінч.наук. - досл. роботах у вузах УРСР. Металургійна промисловість. Київ: Вища школа, 1973. - Вип. 6. - 33с.
30. Дослідження ефективності застосування технологічних мастил при гарячій прокатці на безперервному тонколистовому стані І680 /О.П.Грудєв, О.П.Чекмарьов, О.П.Максименко та ін. // Реф.інф. про закінч.наук. - досл. роботах у вузах УРСР. Металургійна промисловість. Київ: Вища школа, 1974. - Вип. 7. - 76с.
31. Технологічне мастило при гарячій прокатці листа в кліті тріо-Лаута /О.П.Грудєв, К.О.Іванов, О.П.Максименко та ін. // Металург. - 1975. - №5. - С.40-42.
32. Максименко О.П. Дослідження прокатки в режимі рідинного тертя. - Дніпродзержинськ, 1983. - 8с. - Деп. в Укр НДІНТІ. - № 49-83.
33. А.с. 40760І /СРСР/. Пристрій для нанесення технологічного мастила на валки /О.П.Чекмарьов, О.П.Грудєв, О.П.Максименко, Ю.В.Зільберг, В.Т.Тилик та ін. - Опубл. Б.І., 1973, №47.
34. А.с. 500634 /СРСР/. Пристрій для нанесення мастила на валки при гарячій прокатці металу /О.О.Динник, В.П.Галицький, О.П.Максименко, А.М.Должанський та ін. - Опубл. Б.І., 1976, №4.

35. А.с. 556860 /СРСР/. Пристрій для подачі мастила в зону деформації при прокатці /О.П.Грудєв, О.П.Максименко, І.І.Брусенко, А.М. Должанський .- Оубл. Б.І., 1977, №17.
36. А.с. 532417 /СРСР/. Пристрій для подачі технологічного мастила на прокатні валки /О.П.Грудєв, О.П.Максименко, Ю.В.Зільберг, Ю.В.Сигалов, А.М. Должанський.- Оубл. Б.І., 1976, №39.
37. А.с. 359075 /СРСР/. Спосіб подачі мастила в осередок деформації багатовалкових прокатних станів /О.П.Чекмарьов, О.П.Грудєв, О.П.Максименко, К.О. Іванов.- Оубл. Б.І., 1972, №35.
38. А.с. 589046 /СРСР/. Спосіб подачі рідкого мастила в осередок деформації при гарячій прокатці /О.П. Максименко, О.П. Грудєв, Б.М. Ілюкович, Б.М.Бойко та ін.- Оубл. Б.І., 1978.
39. А.с. 786167 /СРСР/. Спосіб одержання полімерного покриття на виробках з металу. /О.П.Максименко, М.М.Гелерман, В.М.Самохвал.- Оубл. з грифом ДЖ.
40. А.с. 1151338 /СРСР/. Спосіб змащування при прокатці /О.П.Максименко, О.П.Грудєв, В.М.Самохвал та ін.- Оубл. Б.І., 1985, №15.
41. А.з. 12464473 /СРСР/. Технологічне мастило для гарячої прокатки. /О.П.Максименко, Ю.І.Коковихін, В.М.Самохвал та ін.- Оубл. з грифом ДЖ.
42. А.с. 1312825 /СРСР/. Пристрій для нанесення мастила на прокатні валки. /О.П.Максименко, Е.В.Галицький, В.М.Самохвал та ін.- Оубл. з грифом ДЖ.
43. А.с. 1347988 /СРСР/. Пристрій для розпилу рідини /В.М.Самохвал, О.П.Максименко, Е.В.Галицький та ін.- Оубл. Б.І., 1987, №40.
44. Система подачі технологічного мастила при гарячій прокатці листа. /О.П.Максименко, О.П.Грудєв, Т.В.Ярова. Позитивне рішення на заявку на авт. свід. №4763451/02 від 20.08.90.
45. А.с. 1540876 /СРСР/. Спосіб прокатки металу /О.П.Максименко, В.М.Єршов, В.М.Самохвал та ін.- Оубл. Б.І., 1990, №5.
46. А.с. 1524273 /СРСР/. Спосіб прокатки на блюмінгу /О.П.Максименко, В.М.Самохвал, Е.В. Галицький та ін.- Оубл. з грифом ДЖ.
47. А.с. 1214256 /СРСР/. Спосіб прокатки смуг /О.П.Максименко, Е.В.Галицький, В.М.Самохвал та ін.- Оубл. Б.І., 1986, №6.

*Г/П-3*



00000000

469539

АВ 26.535  
АВ 26.535

Підп. до печ. 13.01.1993.

Формат 60x84 I/I6.

Ксероко. Усл. печ. л. 20. Тираж 120. Зам. №18. Безплатно.

---

ДП. 322618, м. Дніпропетровськ,  
Дніпропетровсько І обл.,  
вул. Дніпробудівська, 2