

**П.С. Харлашин,
В.С. Волошин, Г.С. Єршов, Т.М. Чаудрі
В.П. Тарасов, О.М. Скребцов, В.І. Капланов,
В.О. Роянов, Л.К. Лещинський, В.П. Сударєв**

Присвячено 75-річчю ПДТУ

МЕТАЛУРГІЯ

(ПРОБЛЕМИ, ТЕОРІЯ, ТЕХНОЛОГІЯ, ЯКІСТЬ)

Під загальною редакцією проф. П.С. Харлашина

Затверджено Міністерством освіти і науки України як підручник для студентів, які навчаються за спеціальностями «Металургія чорних металів», «Ливарне виробництво», «Обробка металів тиском», «Технологія та обладнання, відновлення і підвищення зносостійкості машин і конструкцій», «Прикладне матеріалознавство», «Економіка підприємств», «Металургійне обладнання»

669.18
ИЗЧО

УДК ~~669.18:536.7.531.3(07)~~
Х21

П.С. Харлашин,
В.С. Волошин, Г.С. Єршов, Т.М. Чаудрі,
В.П. Тарасов, О.М. Скребцов, В.І. Капланов,
В.О. Роянов, Л.К. Лещинський, В.П. Сударєв

Металургія (проблеми, теорія, технологія, якість)
Підручник. – ПДТУ, 2004. – 723 с.: ілюстр.

У підручнику висвітлені на сучасному рівні основні теоретичні положення і особливості їх практичного використання у виробництві якісної металургійної продукції.

Для підготовки магістрів металургійних спеціальностей у ВНЗ. Може бути корисним для аспірантів, наукових співробітників та працівників металургійного виробництва.

Табл. 93 Ілюстр. 246 Бібліогр. 556 назв.

Рецензенти: зав. кафедрою металургії сталі ДНМАУ, докт. техн. наук, професор Бойченко Б.М., зав. кафедрою металургії чавуну ДНМАУ, докт. техн. наук, професор Татаканов А.К., заслужений діяч науки і техніки України докт. техн. наук, професор ДДТУ Коновалов Ю.В., головний науковий співробітник ДонНДЧермет, докт. техн. наук, професор Курганов В.А., декан Маріупольського факультету Одеської державної морської академії, докт. техн. наук, професор Кравцов Т.Г., заслужений діяч науки і техніки України докт. техн. наук, професор Пак В.В.

Гриф надано 20.12.2004 № 14/18.2-2724
Міністерством освіти і науки України

ISBN 966-8085-30-2

© Норд-Прес, 2004

© П.С. Харлашин,
В.С. Волошин, Г.С. Єршов, Т.М. Чаудрі
В.П. Тарасов, О.М. Скребцов, В.І. Капланов,
В.О. Роянов, Л.К. Лещинський, В.П. Сударєв
2004 р.



560736

ПЕРЕДМОВА

Підручник «Металургія (проблеми, теорія, технологія, якість)» складений відповідно до плану перебудови вищої освіти України з урахуванням її багатоступеневості. Він заснований на нових навчальних планах і програмах підготовки бакалаврів, спеціалістів і магістрів.

Підручник складається із шести розділів, які на сучасному рівні відображають основні теоретичні положення й особливості їхнього практичного застосування у виробництві якісної металургійної продукції.

Провівши глибокий аналіз сучасного стану промислових процесів і використовуючи багаторічний досвід викладання металургійних дисциплін, автори побудували виклад навчального матеріалу таким чином, щоб вивчення теоретичних питань і аналіз наведених експериментальних даних дозволили: а) використовувати отримані знання для прогнозування якості чавуну, сталі і прокату; б) застосовувати методи наукового управління формуванням структури і властивостей готових виробів у процесі їхнього виробництва.

У 1-ому розділі на основі аналізу різних гіпотетичних моделей будови рідини розглядається модель її неоднорідної будови, яка враховує такі важливі сторони природи розплаву: рівноправність двох якісно протилежних видів руху часток рідини – трансляційного і коливального, а також істотну роль сил між-атомного притягання у формуванні конденсованого стану.

Розробці цієї моделі присвячені роботи Б.А. Баума, Г.С. Єршова, Г.Н. Єланського. Концепція структурних перетворень у металевих розплавах базується на експериментальних даних, які виявляють аномалії в температурних залежностях структурно чутливих властивостей досліджуваних розплавів, котрі дозволили зробити висновок, що розплави – це, як правило, нерівноважні системи, структура яких генетично пов'язана зі структурою вихідних матеріалів.

Численними експериментами визначений ступінь впливу умов підготовки металевих розплавів (стану вихідних матеріалів, температурного режиму плавки, ступеня рафінування металеві ванни) на ступінь нерівноважності їхньої структури перед кристалізацією і кінцеві фізико-механічні властивості металів і сплавів, що повинно бути використане при створенні прогресивних технологій їхньої виплавки, які включають хімічне і температурне модифікування, легування, позапічну обробку й інші сучасні способи направленого впливу на структуру і властивості сталей і сплавів. Таке наукове регулювання процесу формування структурної і хімічної мікрооднорідності розплавів є найбільш актуальним технологічним завданням металургійного виробництва.

Можливості управління структуроутворенням розглянуті в теоретично-

му і практичному плані на всіх основних стадіях виплавки сталі, визначені оптимальні теплові, кінетичні і рафінувальні режими плавки й обробки металу.

У 2-ому розділі представлені проблеми теорії і практики доменної плавки. Для кращого засвоєння теоретичні питання і технологія доменного виробництва представлені в підручнику у вигляді окремих стадій - газодинамічних, відновлювальних, масо- і теплообмінних процесів, фізико-механічних умов розподілу і руху твердих матеріалів у печі, переходу їх у рідкий і газоподібний стан і т.д., причому виклад найбільш складного матеріалу починається з простих завдань з подальшим їхнім ускладненням.

Теоретичні дослідження підтверджуються експериментами. При цьому низка результатів експериментів, наприклад, з газодинаміки доменного процесу і технології радіального управління ходом газу, опубліковані вперше. Представлено математичні залежності зміни газодинамічних параметрів від складу і стану шихтових матеріалів, черговості й умов їхнього завантаження і т.д., за якими стало можливим розрахувати порозність шару шихти, еквівалентний діаметр порових каналів, об'єми газових потоків і втрати напору газів по вертикальних і горизонтальних перетинах печі.

При викладенні закономірностей відновлення оксидів заліза й інших елементів велика увага приділена кінетиці процесу з урахуванням новітніх досліджень, підтверджених лабораторними і промисловими випробуваннями.

Матеріал містить рекомендації з вибору доменного обладнання, яке забезпечує високі техніко-економічні показники, екологічну чистоту виробництва і високу якість чавуну. Показано перспективи подальшого розвитку доменного виробництва.

Вивченню найбільш важливих стадій процесів затвердіння і формування структури зливків і виливків за допомогою радіоактивних ізотопів присвячений 3-ій розділ. У ньому спочатку викладена у стислій і доступній формі методика металургійних досліджень за допомогою радіоіндикаторів.

Проаналізувавши опубліковану в літературі методику і результати вивчення процесу модифікування чавуну за допомогою радіоактивних ізотопів, автори даного дослідження знайшли в ній систематичні невраховані помилки. Основними з них є: а) ефекти посиленого потемніння фотоматеріалів над раковинами й іншими поглибленнями поверхні проб, у тому числі і над графітовими включеннями, що створює видимість підвищення тут концентрації радіоіндикатора (і модифікатора чавуну); б) ефекти істотно різного самопоглинання випромінювання ізотопів у легкій (графітовій) і у важкій (металевій) фракціях порошкоподібних проб, виділених з чавуну. Зроблено висновок про те, що адсорбційно-дифузійна теорія модифікування чавуну, створена за результатами радіоізотопних досліджень, не має достатнього експериментального підтвер-

дження. Проведене дослідження дає можливість більш обґрунтовано підходити до розрахунку необхідної кількості добавлення модифікатора чавуну.

Всебічно вивчені процеси переміщень металевого розплаву в затвердіваючих зливках і виливках, що для зручності вивчення і кількісного опису розділені на 5 періодів, які відповідають стадіям одержання виливків: заповненню форми розплавом; виникненню стійкого розподілу температури в розплаві; росту стовпчастих кристалів; виникненню ізольованих кристалів у центральній частині; виникненню в центральній частині суцільного каркаса твердого металу з прожилками рідкого.

Викладено деякі питання формування фізичної і хімічної неоднорідності структури зливків, зокрема за допомогою радіоіндикаторів описана кінетика виділення неметалічних включень у серцевині затвердіваючого зливка і загальна картина їхнього розподілу в металі, а також вказані сучасні методи поліпшення спрямованості кристалізації і структури зливків шляхом управління конвективними потоками розплаву і застосування внутрішніх холодильників, які розплавляються.

Описано процеси конвекції розплаву в безперервнолитих зливках, отриманих на сучасних установках безперервного розливання сталі (УБРС) і електрошлакового переплаву (ЕШП), при цьому наведені результати експериментального визначення коефіцієнтів конвективної дифузії і затвердіння сталі, глибини проникнення струменя сталі в розплав і швидкості потоків.

Вивчено кінетику переміщення розплаву з прибутку в тіло зливка і наведені результати дозволили уточнити представлення про механізм цього процесу, виявивши одну з головних його причин – усадку металу при його затвердінні.

Результати досліджень, виконаних автором у виробничих умовах із застосуванням методу радіоактивних ізотопів, узгоджуються з результатами вивчення аналогічних процесів методами фізичного і математичного моделювання. Проаналізовано взаємозв'язок отриманих результатів з існуючими теоретичними поглядами на формування різних типів зливків і виливків, які у ряді випадків доповнені.

У 4-ому розділі викладена сучасна теорія високошвидкісної холодної прокатки тонких штаб.

Аналіз сучасного стану прокатного виробництва виявив основний напрямок його розвитку – постійне збільшення швидкості прокатки і необхідність більш глибокого вивчення основних закономірностей, особливостей і розкриття фізико-механічної сутності високошвидкісної прокатки.

Всебічні теоретичні дослідження процесу високошвидкісної прокатки спрямовані на знаходження фізичних меж, які визначають максимально можливу швидкість прокатки, й у великій мірі залежних від прояву інерційних сил,

пов'язаних з видом і станом металу, що прокатується, ступенем його обтиснення, величиною контактної тертя й інших умов прокатки. Найбільш повно врахувати вплив цих сил на динамічний ефект в осередку деформації і простежити закономірності зміни основних показників прокатки в діапазоні ще не освоєних промисловістю швидкостей дала можливість математична модель, за допомогою якої досліджений процес, виконаний його теоретичний аналіз, намічені шляхи управління ним і розроблені системи автоматичної підтримки оптимальних умов прокатки за допомогою ЕОМ.

На шляху досягнення основної мети високошвидкісної прокатки тонких штаб – підвищення техніко-економічних показників за рахунок прискорення процесу і збільшення маси рулонів у процесі досліджень вирішуються практичні завдання: розробка ефективних технологічних мастил, оптимальний тепловий режим валків, якість штаб, автоматизація процесу та ін.

Наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень дадуть більш широке уявлення про процес високошвидкісної прокатки і нададуть практичну допомогу при проектуванні, модернізації й експлуатації прокатних станів.

У 5-ому розділі описані металургійні процеси в рідкій фазі при наплавленні під флюсом, що застосовується при виготовленні чи відновленні унікальних виробів.

Розглянуто теоретичні основи дугового і електрошлакового наплавлення металів і сплавів з утворенням нероз'ємного з'єднання в рідкій фазі. Складні явища цього процесу розділені на дві групи питань. Перша відноситься до енергетики процесу і пов'язана з вивченням плавлення електродів, флюсів, шихти й основного металу, закономірності якого визначають найважливіші параметри металургійних процесів у рідкій фазі, – час і умови взаємодії металу зі шлаком і газами, поверхні контактуючих фаз, швидкість масопереносу, теплову і гідродинамічну обстановку в зоні взаємодії. Друга група питань пов'язана з вивченням власне металургійних процесів – їхньої термодинаміки і кінетики, ролі окремих стадій у протіканні реакцій, легуванні металу.

У розділі 6-ому розглянуті питання підвищення якості металопродукції, точності і стабільності технологічних процесів з використанням економіко-статистичних методів.

У чорній металургії методи математичної статистики з урахуванням особливостей складних процесів виробництва дозволяють одержати об'єктивний кількісний опис показників якості металопродукції і надійно ними керувати. У той же час застосування статистичних методів у металургії пов'язано зі значними труднощами, вимагає спеціальної підготовки кадрів і вирішення низки теоретичних, методологічних і організаційних питань.

Тут важливо, насамперед, щоб основна увага приділялася не формальній і обчислювальній стороні справи, більш-менш широкому застосуванню методів математичної статистики для одержання в більшій чи меншій мірі розгорнутих кількісних характеристик залежності досліджуваних показників якостей від визначальних факторів, а питанням загального методологічного порядку, що мають основне значення для організації дослідження в цілому і правильне вирішення яких визначає значимість отриманих результатів.

У роботі викладено вирішення конкретних завдань контролю і управління якістю продукції.

При викладі матеріалу автори виходили з того, що читач ознайомлений з основами теорії ймовірностей і математичної статистики.

Розділ 1-ий написаний П.С. Харлашиним, В.С. Волошиним, Г.С. Єршовим, Т.М. Чаудрі, розділ 2-ий – В.П. Тарасовим, розділ 3-ий – О.М. Скребцовим, розділ 4-ий – В.І. Капановим, розділ 5-ий – В.О. Рояновим, Л.К. Лепинським, розділ 6-ий – В.П. Сударєвим.

Автори виказують вдячність Смолянській О.В., Єфремовій А.В. та Левицькій Т.О. за допомогу в оформленні та виданні книги.

Підручник не претендує на повне охоплення всіх питань теорії і практики металургійного виробництва.

В усіх розділах підручника наведені не тільки аналітичні огляди сучасного стану розглянутих теоретичних і практичних питань розвитку металургії, але й власні дослідження і розробки авторів, виконані співробітниками ПДТУ і промислових підприємств, спрямовані на удосконалення технологій одержання металу високої якості.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	3
РОЗДІЛ I. ТЕОРЕТИЧНІ І ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ.	8
ГЛАВА 1.1 СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ І ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ	8
1.1.1 Властивості й особливості будови рідкого металу.....	8
1.1.2 Сучасні представлення про структуру металевих розплавів	10
1.1.3 Нерівноважний стан металевих розплавів.	30
ГЛАВА 1.2 ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ВЛАСТИВОСТЕЙ РІДКИХ І ТВЕРДИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ	40
1.2.1 Мікронеоднорідність рідких металів і сплавів.	40
1.2.2 Спадковість структури і властивостей рідких і твердих металів.....	54
1.2.3 Дослідження структури рідких металів.....	63
ГЛАВА 1.3 ВПЛИВ ДОМІШОК НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ І ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ У СТАЛЯХ І СПЛАВАХ.	81
1.3.1 Рівні структур сталей і сплавів.	81
1.3.2 Вплив домішок на структуру і властивості сталей і сплавів.....	83
1.3.3 Нейтралізація негативного впливу домішок.	92
1.3.4 Спільний вплив тугоплавких і горючих елементів на структуру і властивості сталей.	98
ГЛАВА 1.4 ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ З УРАХУВАННЯМ СПЕЦИФІКИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ.....	104
1.4.1 Сучасні способи виплавки сталей і сплавів.	107
1.4.2 Деформаційно-термічна обробка сталей масового призначення.	119
1.4.3 Вплив зовнішніх впливів на структуроутворення в металах.	127
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	150
РОЗДІЛ II. ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ	155
ГЛАВА 2.1. ГАЗОДИНАМІКА ДОМЕННОГО ПРОЦЕСУ	155
2.1.1. Протитечія шихтових матеріалів і грубних газів у доменній печі.....	155
2.1.2. Газодинаміка зернистого шару.....	158
2.1.3. Особливості газодинаміки стовпа шихти у реальних умовах доменної плавки.....	162

2.1.4.	Методи управління газовим потоком по окружності і радіусу доменної печі	165
2.1.5.	Газодинаміка шару по радіусу печі	171
2.1.6.	Оптимізація газодинаміки доменної плавки	179
ГЛАВА 2.2.	РОЗКЛАДАННЯ ПЛАВИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ. ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА Й ІНШИХ МЕТАЛІВ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ	187
2.2.1.	Розкладання гідратів і карбонатів	187
2.2.2.	Структура і властивості оксидів заліза	190
2.2.3.	Основні закономірності відновлення оксидів заліза газоподібними відновниками	194
2.2.4.	Відновлення оксидів заліза вуглецем	197
2.2.5.	Кінетика відновлення заліза	200
2.2.6.	Вплив різних факторів на процеси відновлення оксидів заліза	207
2.2.7.	Відновлення оксидів інших металів, крім заліза	214
2.2.8.	Особливості відновлення оксидів металів у доменній печі	218
ГЛАВА 2.3.	УТВОРЕННЯ РІДКИХ ПРОДУКТІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ	222
2.3.1.	Утворення чавуну	222
2.3.2.	Утворення шлаку	224
2.3.3.	Склад і властивості шлаків	226
2.3.4.	Діаграми стану шлакових систем	229
2.3.5.	Вплив властивостей і кількості шлаків на десульфурізацію чавуну	233
2.3.6.	Позадоменна обробка чавуну і шлаку	236
2.3.7.	Будова твердих і рідких шлаків	239
ГЛАВА 2.4.	ПРОЦЕСИ В ГОРНІ	242
2.4.1.	Горіння вуглецю біля фурм і склад газу в горні	242
2.4.2.	Особливості газодинаміки низу печі при високонагрітому комбінованому дутті	245
2.4.3.	Вплив фільтрації рідких продуктів плавки на газодинаміку низу печі	249
2.4.4.	Ефективність регулювання витрати дуття і природного газу по фурмах	253
2.4.5.	Вплив на газодинаміку низу печі випуску рідких продуктів плавки	255
ГЛАВА 2.5.	ОСОБЛИВОСТІ ГАЗОДИНАМІКИ ПЕЧЕЙ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ. ТЕПЛО- І МАСООБМІН У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ	259
2.5.1.	Співвідношення основних розмірів печей великої одиничної потужності	259

2.5.2.	Інтенсивність плавки і питома продуктивність доменних печей.....	261
2.5.3.	Теплообмін по висоті доменної печі.....	263
2.5.4.	Тепло- і масообмін у реальних умовах доменного процесу.....	265
ГЛАВА 2.6.	ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА.....	271
2.6.1.	Техніко-економічні показники доменної плавки.....	271
2.6.2.	Подальший розвиток існуючих способів підготовки шихтових матеріалів.....	275
2.6.3.	Перспективи розвитку доменного виробництва.....	278
2.6.4.	Збільшення розмірів доменних печей з установленням безконусних завантажувальних пристроїв.....	281
	БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	285
РОЗДІЛ III.	РІЗНІ ПИТАННЯ ЗАТВЕРДІННЯ І ФОРМУВАННЯ БУДОВИ ЗЛИВКІВ І ВИЛИВКІВ.....	290
ГЛАВА 3.1.	РОЗРОБКА ТЕОРІЇ МОДИФІКУВАННЯ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ З КУЛЯСТИМ ГРАФІТОМ.....	290
3.1.1.	Короткий опис методики металургійних досліджень за допомогою радіоактивних індикаторів.....	292
3.1.1.1.	Вибір радіоактивних ізотопів для дослідження і їхні властивості.....	292
3.1.1.2.	Реєстрація радіоактивних ізотопів у пробах матеріалів.....	294
3.1.2.	Методика і результати авторадіографічних досліджень процесу формування високоміцного чавуну.....	296
3.1.2.1.	Помилкові ефекти при авторадіографії.....	298
3.1.2.2.	Експериментальне дослідження потемніння фотоматеріалів над радіоактивним металом зі штучними дефектами.....	306
3.1.3.	Результати досліджень процесу формування високоміцного чавуну по концентрації радіоіндикатора у твердих фазах.....	309
3.1.4.	Розподіл у структурі твердого чавуну невеликих добавок елементів, введених у рідкий розплав.....	311
3.1.5.	Висновок.....	314
ГЛАВА 3.2.	П'ЯТЬ ПЕРІОДІВ ПЕРЕМІЩЕНЬ РОЗПЛАВУ В ТВЕРДІЮЧИХ ЗЛИВКАХ І ВИЛИВКАХ.....	315

3.2.1.	Загальні особливості кристалічної будови зливка сталі і виливка.....	315
3.2.2.	Розповсюджені і загальноприйняті в літературі схеми переміщень розплаву в рідкій серцевині твердіючого зливка або масивного виливка.....	316
3.2.3.	Періоди і причини переміщень твердіючого розплаву.....	318
3.2.4.	Перший період - заповнення форми розплавом.....	320
3.2.5.	Другий період – виникнення стійкого розподілу температури в розплаві.....	322
3.2.6.	Третій період – ріст стовпчастих дендритів.....	326
3.2.6.1.	Про можливість замкнутої циркуляції розплаву в твердіючому зливку або виливку	326
3.2.6.2.	Вивчення конвекції розплаву по розподілу ізотопу в затверділому металі зливка або виливка	331
3.2.6.3.	Особливості руху розплаву біля фронту кристалізації. Причина руху і його результат	339
3.2.6.4.	Вивчення конвекції розплаву за допомогою фізичного і математичного моделювання.....	352
3.2.6.5.	Схема переміщення розплаву у третьому періоді формування зливка або виливка.....	355
3.2.7.	Четвертий період – виникнення ізольованих кристалів у центральній частині виливка або зливка	356
3.2.7.1.	Швидкість опускання ізольованих кристалів у розплаві сталі	357
3.2.7.2.	Утворення шнурів ("вусів") позацентральної ліквациї.....	359
3.2.8.	ЗП'ятий період - виникнення з ізольованих кристалів у центральній частині зливка суцільного каркаса твердого металу з прожилками рідкого.....	361
ГЛАВА 3.3.	ДЕЯКІ ПИТАННЯ ЗАТВЕРДІННЯ І ФОРМУВАННЯ ФІЗИЧНОЇ І ХІМІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ МЕТАЛУ ЗЛИВКІВ.....	363
3.3.1	Спливання неметалічних включень у рідкій серцевині зливка сталі.....	363
3.3.2.	Утворення "ліквацийного" квадрата в структурі металу зливка і прокатоного металу	365
3.3.3.	Проникнення теплоізоляційних матеріалів засипки прибутку зливка в об'єм розплаву сталі.....	368
3.3.4.	Глибина проникнення радіоактивних ізотопів із прибутку в об'єм звичайного зливка	372

3.3.5. Осаджувальна кристалізація і затвердіння зливка по напрямку знизу вверху	373
3.3.6. Сучасні уявлення про утворення "конуса осадження" у зливках і виливках	376
3.3.7. Схема переміщень розплаву в зливку і можливості поліпшення його будови й якості металу	382
ГЛАВА 3.4. ВИВЧЕННЯ КОНВЕКЦІЇ РОЗПЛАВУ В БЕЗПЕРЕРВНОЛИТИХ ЗЛИВКАХ.....	387
3.4.1. Конвекція в рідкому спокійному металі. Коефіцієнти затвердіння сталі	388
3.4.2. Глибина проникнення струменя в розплав зливка; швидкість потоків	391
3.4.3. Вивчення конвекції методом фізичного і математичного моделювання	394
3.4.4. Конвекція розплаву при розливанні способом "плавка на плавку"	397
3.4.5. Переміщення розплаву і виникнення смуг підвищеної радіоактивності біля фронту затвердіння розплаву	399
3.4.6. Переміщення розплаву з рідкої серцевини зливка о гарячих тріщинах затверділого металу	403
3.4.7. Конвекція розплаву в зливках сталі електропереплавних процесів.....	406
ГЛАВА 3.5. ПЕРЕМІЩЕННЯ МЕТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ З ПРИБУТКУ В ТІЛО ТВЕРДІЮЧОГО ВИЛИВКА	412
3.5.1. Короткий стан питання за літературними даними	412
3.5.2. Методика вивчення живлення розплавом тіла виливка [126-130].....	413
3.5.3. Розробка нової методики оцінки інтенсивності переміщення розплаву з прибутку в тіло твердіючого виливка за результатами дослідів К.М. Миліцина	414
3.5.4. Експериментальні результати авторів робіт [126-130] і обчислені за ними коефіцієнти конвективної дифузії розплаву з прибутку в тілі виливка	416
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	419
РОЗДІЛ IV. СУЧАСНА ТЕОРІЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТОНКИХ ШТАБ	428
ГЛАВА 4.1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТОНКИХ ШТАБ	428
4.1.1. Вплив швидкості на параметри прокатки	429

4.1.2.	Механічні властивості холоднокатаних штаб	438
4.1.3.	Деякі особливості високошвидкісної прокатки.....	441
ГЛАВА 4.2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОСЕРЕДКУ		
ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНИЙ		
ПРОКАТЦІ ТОНКИХ ШТАБ.....		445
4.2.1.	Розподіл нормальних контактних напруг по дузі контакту при холодній прокатці з урахуванням зміцнення металу й інерційних сил	445
4.2.2.	Товщина штаби в нейтральному перерізі осередку деформації	462
4.2.3.	Середній тиск металу на валки	464
4.2.4.	Сила, момент, потужність і робота інерції.....	467
4.2.5.	Гранична швидкість прокатки.....	470
4.2.6.	Порівняння результатів, розрахованих за новими формулами, з експериментальними даними	471
4.2.7.	Порівняння отриманих формул з деякими відомими формулами.....	479
4.2.8.	Теоретичний аналіз впливу інерційних сил на параметри прокатки.....	486
4.2.9.	Про причини динамічного ефекту	502
4.2.10.	Алгоритм розрахунку енергосилових параметрів прокатки.....	503
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК		529
Додаток І		536
Додаток ІІ		542
РОЗДІЛ V МЕТАЛУРГІЙНІ ПРОЦЕСИ В РІДКІЙ ФАЗІ ПРИ		
НАПЛАВЛЕННІ ПІД ШАРОМ ФЛЮСУ		544
ГЛАВА 5.1. ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ УТВОРЕННЯ РІДКОЇ ФАЗИ		
ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ПІД ФЛЮСОМ		544
5.1.1.	Основні характеристики зварювальної дуги	546
5.1.2.	Вплив геометрії електрода на характеристики дуги	550
5.1.3.	Роль дугового і електрошлакового процесів при наплавленні під флюсом.....	552
5.1.4.	Енергетичні процеси в шлаковій ванні.....	556
ГЛАВА 5.2. ПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДНОГО Й ОСНОВНОГО		
МЕТАЛУ, УТВОРЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ВАННИ		559
5.2.1.	Вплив геометрії електрода на характеристики розплавлення	559
5.2.2.	Плавлення флюсу	562

5.2.3.	Нагрівання стрічкового електрода розплавленим шлаком	565
5.2.4.	Плавлення основного металу й утворення зварювальної ванни.....	570
5.2.5.	Формування наплавленого металу з різномірною макроструктурою	579
ГЛАВА 5.3.	ВЗАЄМОДІЯ МЕТАЛУ І ШЛАКУ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ПІД ФЛЮСОМ	583
5.3.1.	Термодинаміка і кінетика реакцій при наплавленні.....	583
5.3.2.	Легування наплавленого металу через електрод суцільного перерізу.....	587
5.3.3.	Легування наплавленого металу через керамічний флюс	590
5.3.4.	Особливості легування при наплавленні порошковими електродами	595
ГЛАВА 5.4.	ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ УМОВ ВЗАЄМОДІЇ МЕТАЛУ І ШЛАКУ ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ПІД ШАРОМ ФЛЮСУ	601
5.4.1.	Метод елемента-«індикатора» для визначення маси шлаку, що контактує з металом при зварюванні	601
5.4.2.	Виведення розрахункової формули для визначення відносної маси флюсу, що контактує з металом.....	603
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК		607
РОЗДІЛ VI	ЕКОНОМІКО-СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ	613
ГЛАВА 6.1.	ФОРМУВАННЯ ОДНОРІДНИХ ВИБІРОК ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЯКОСТІ ПРОКАТУ ЗА МЕХАНІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	613
6.1.1.	Роль економіко-статистичних методів при дослідженні якості металопродукції.....	613
6.1.2.	Статистичні сукупності при дослідженні якості металопродукції за механічними характеристиками	616
6.1.3.	Визначення обсягу вибірки.....	621
6.1.4.	Статистичні оцінки показників плавочного хімічного складу і механічних властивостей металопродукції.....	628
6.1.5.	Перевірка однорідності металу за хімічним складом і механічними властивостями	630
ГЛАВА 6.2.	ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ ВІД ПЛАВОЧНОГО ХІМІЧНОГО СКЛАДУ	636
6.2.1.	Перевірка умов застосування методів кореляції і регресії.....	636
6.2.2.	Визначення форми зв'язку між ознакою і фактором	641

6.2.3.	Вибір форми багатofакторних кореляційних залежностей показників механічних властивостей від плавочного хіmsкладу за марками сталі	643
6.2.4.	Багатofакторні кореляційні залежності показників механічних властивостей від плавочного хіmsкладу за марками сталі і профілями прокату	647
6.2.5.	Багатofакторні кореляційні залежності показників механічних властивостей сортового прокату за марками сталі	649
6.2.6.	Кореляційні залежності показників механічних властивостей від вуглецевого еквівалента.	652
ГЛАВА 6.3.	ОРГАНІЗАЦІЯ СТАТИСТИЧНОГО БЕЗПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ І СТАТИСТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	661
6.3.1.	Організація статистичного безперервного контролю якості металопродукції	661
6.3.2.	Впровадження статистичних методів аналізу точності і стабільності якості прокату за механічними характеристиками	667
6.3.3.	Статистичне регулювання технологічного процесу	669
6.3.4.	Експериментальна оцінка внутрішплавочної неоднорідності сталі за механічними характеристиками	676
6.3.5.	Статистичний безперервний контроль і управління якістю холоднокатаної листової сталі з використанням магнітометрів	680
ГЛАВА 6.4.	УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЛИСТОВОЇ СТАЛІ ПО ІНТЕРВАЛАХ ПОЛІВ ДОПУСКІВ	686
6.4.1.	Статистична оцінка контрольних нормативів	686
6.4.2.	Однорідність відхилень товщини листа на його кінцях від номінального розміру для різних товщин і інтервалів товщин листа по інтервалах полів допусків ...	687
6.4.3.	Характер розподілів відхилень товщини листа від номінального розміру по інтервалах полів допусків	691
6.4.4.	Однорідність відхилень товщини листа від номінального розміру по інтервалах полів допусків	694
6.4.5.	Визначення інтервалів полів допусків	695
	БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК	699
	ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ	701
	ЗМІСТ	715