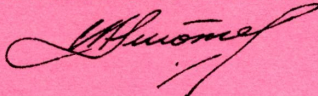


669.15

798

ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

**ТЮТЕРЄВ ІГОР АНАТОЛІЙОВИЧ**



УДК 669.15.293.292-194

(043)

798

**ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ 10Г2ФБ  
УСУНЕННЯМ ПЕРЛІТНОЇ СМУГАСТОСТІ**

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2007



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Придніпровській державній академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.



**Науковий керівник:**

лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор БОЛЬШАКОВ Володимир Іванович, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, завідувач кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів, ректор.

**Офіційні опоненти:**

- доктор технічних наук, професор Мешков Юрій Якович, Інститут металофізики НАН України (м. Київ);
- кандидат технічних наук, доцент Погребна Наталія Еміліївна, Національна металургійна академія України, доцент кафедри металознавства.

**Провідна установа**

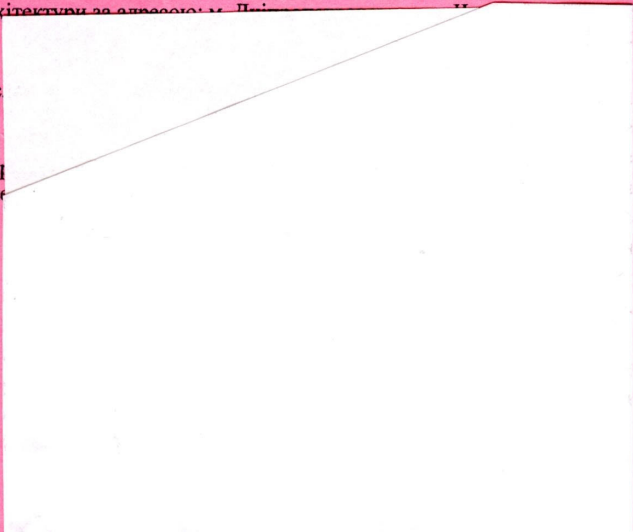
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, відділ матеріалознавства сталі, м. Київ.

Захист відбудеться "12" квітня 2007 р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.08.5.02 при Придніпровській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 49600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського, 24-а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Придніпровської державної академії будівництва та архітектури за адресою: м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського, 24-а.

Автореферат розіслано

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради



**Актуальність роботи.** На сучасному етапі розвитку будівельна галузь України стає одним із головних споживачів металопрокату, що виробляється в нашій країні. Така тенденція пов'язана зі спорудженням багатоповерхових будівель та великопрольотних споруд.

Вітчизняний і зарубіжний досвід свідчить, що найбільш перспективними для виготовлення будівельних металоконструкцій відповідального призначення є маловуглецеві низьколеговані сталі підвищеної і високої міцності. Цей клас сталей відрізняється низькою собівартістю порівняно з легованими, а також низьким вуглецевим еквівалентом, і, як наслідок, гарною зварюваністю.

Однією із сталей, яка задовольняє необхідним вимогам, є сталь 10Г2ФБ, що виготовляється металургійними комбінатами України. Ця сталь знайшла широке застосування при будівництві магістральних нафто- і газопроводів великих діаметрів „північного” виконання.

Разом з тим, діючи в нашій країні будівельні норми і правила, розроблені в 80-х роках минулого сторіччя, не передбачають використання у будівництві сталей типу 10Г2ФБ.

Однією з причин, через які ця сталь до останнього часу не використовується у будівництві, є анізотропія механічних властивостей, пов'язана з наявністю в ній перлітної смугастості. При будівництві магістральних газопроводів цей недолік сталі 10Г2ФБ не є визначальним, що пов'язано з напрямком прикладення навантажень, які витримує труба. В той же час, при використанні будівельних металевих конструкцій, наприклад, двотарових балок, які працюють в умовах динамічних навантажень з великим згинальним моментом, низькі механічні властивості в напрямку, перпендикулярному до площини листа (Z- напрямку), можуть спричинити до розшарування металу і руйнування конструкції.

У зв'язку з цим робота, спрямована на поліпшення комплексу експлуатаційних характеристик за рахунок удосконалення структури сталі 10Г2ФБ з метою подальшого застосування її у відповідальних будівельних металевих конструкціях, є актуальною.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертація виконувалась відповідно до науково-дослідної роботи "Дослідження, розробка та впровадження маловуглецевих низьколегованих сталей для виготовлення металічних конструкцій масового призначення", що виконується кафедрою матеріалознавства і обробки матеріалів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.

Робота є однією із складових частин наукових досліджень, що виконуються в рамках науково-дослідних тем "Дослідження аустенітно-бейнітних перетворень у вуглецевих і низьколегованих сталях у процесі ТМО" (Державний реєстраційний номер 0102V002363), "Дослідження структурних перетворень у при ТМО і газо-термічних іх будівельних сталях і реєстраційний номер 0106V005345).



**Мета і завдання досліджень.** Метою роботи є поліпшення комплексу механічних властивостей в Z-напрямку сталі 10Г2ФБ за рахунок удосконалення структури металу.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі задачі:

1. Зробити оцінку середнього розміру зерен аустеніту перед початком чистової прокатки за структурою готового прокату для сталі 10Г2ФБ і сталей аналогічного класу зарубіжного виробництва.

2. У лабораторних умовах визначити вплив температурно-деформаційних параметрів обробки сталі 10Г2ФБ на структуру і властивості металу, особливо в напрямку, перпендикулярному до площини листа.

3. Установити особливості ліквідації марганцю і вуглецю в товстолистовій сталі 10Г2ФБ.

4. Визначити вплив суміщення гарячої деформації з одночасним охолодженням на процесі формування сприятливої структури, яка б забезпечила зниження анізотропії властивостей сталі 10Г2ФБ.

5. Розробити і рекомендувати для впровадження у виробництво вдосконалених технологічних переділів при виготовленні товстого листа сталі 10Г2ФБ, що дозволить за рахунок значного подрібнення зерен фериту і перлітних колоній поліпшити комплекс експлуатаційних характеристик даної марки сталі, особливо в Z-напрямку.

**Об'єкт дослідження.** Закономірності процесу формування структури сталі 10Г2ФБ по товщині листа.

**Предмет дослідження.** Вплив режимів термічної обробки, які включають гарячу деформацію з одночасним безперервним охолодженням, на анізотропію властивостей сталі 10Г2ФБ.

**Методи дослідження.** У роботі використані сучасні методи дослідження структури і властивостей металу, а саме:

1) випробування на розтяг циліндричних зразків, в тому числі і в напрямку, перпендикулярному до площини товстого листа;

2) випробування на ударний згін зразків з V-подібним концентратором напруг;

3) кількісна оптична мікроскопія;

4) рентгеноструктурний аналіз;

5) мікрорентгеноспектральний аналіз;

6) дослідження тонкої структури металу методами просвічуваної електронної мікроскопії тонких фольг.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

- *Розроблена нова методика визначення середнього розміру зерна аустеніту за ферито-перлітною структурою прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей шляхом вимірювання відстані між перлітними смугами.* Запропонована методика відрізняється більш точним і швидким визначенням середнього розміру зерна аустеніту, що дозволяє використати її для експрес-аналізу в умовах заводу.

- *Розроблена і запропонована до реалізації в умовах металургійних комбінатів України вдосконала технологічна схема виробництва товстого листа сталі 10Г2ФБ з отриманням дисперсної ферито-перлітної структури.* Реалізація технологічної схеми не вимагає додаткових витрат на переоснащення існуючого обладнання і не знижує технологічності процесу гарячого прокатування, дозволяє підвищити механічні властивості сталі, особливо в напрямку, перпендикулярному до площини товстого листа.

- *Запропоновано спосіб подрібнення аустенітних зерен при гарячому деформуванні маловуглецевої низьколегованої сталі.* Розробка відрізняється суміщенням гарячої деформації з одночасним охолодженням металу. Така технологічна схема дозволяє отримати дрібне зерно аустеніту.

- *Для маловуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ виявлено укрупнення зерен аустеніту в інтервалі температур 950–1050°C.* Розробка відзначається доказом механізму вторинної рекристалізації аустеніту в сталі 10Г2ФБ.

### **Практична цінність отриманих результатів полягає:**

- у впровадженні в практику центральної заводської лабораторії ВАТ „ММК ім. Ілліча” методики визначення середнього розміру зерен аустеніту;

- у зниженні анізотропії властивостей листового металопрокату із маловуглецевих низьколегованих сталей типу 10Г2ФБ;

- у можливості промислового використання в умовах металургійних комбінатів України вдосконаленої технологічної схеми виробництва сталі 10Г2ФБ, що забезпечує отримання більш дрібного зерна фериту та дисперсних колоній перліту;

- у впровадженні в навчальний процес методики розрахунку середніх розмірів зерен аустеніту сталей з ферито-перлітною структурою за середньою відстанню між перлітними смугами.

**Особистий внесок пошукача.** Дисертант отримав результати дисертаційної роботи самостійно. Автором опрацьована методика визначення середнього розміру зерна аустеніту за ферито-перлітною структурою сталі 10Г2ФБ. За допомогою розробленої методики здійснено порівняльний аналіз низьковуглецевих низьколегованих сталей вітчизняного та зарубіжного виробництва. Проведена термомеханічна обробка темплетів сталі 10Г2ФБ з поєднанням гарячої пластичної деформації і безперервного охолодження. Встановлені особливості ліквідації марганцю і вуглецю в

товстолистовій сталі 10Г2ФБ. Дисертантом розроблена та запропонована для промислового використання вдосконалена технологічна схема виробництва сталі 10Г2ФБ, спрямована на підвищення комплексу механічних властивостей, особливо в Z-напрямку, за рахунок формування в товстому листі дисперсної ферито-перлітної структури.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідались і отримали позитивну оцінку на Міжнародних конференціях „Перспективні завдання інженерної науки” (м. Алушта, 2001, 2002 рр.), „Перспективные задачи инженерной науки” (м. Ігало, Чорногорія, 2003 р.), на Міжнародних конференціях „Стародубовські читання” (ІДАБА, м. Дніпропетровськ, 2003, 2004, 2005, 2006 рр.); на міжнародній науково-технічній конференції „Бернштейновские чтения: теория и технология процессов пластической деформации” (МИСИС, г. Москва, 2004 г.).

**Публікації.** За результатами досліджень з дисертаційної роботи опубліковано десять статей, із них дев'ять у виданнях, включених до Списку № 1 наукових спеціальних видань, у яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт, згідно з Постановою ВАК України.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків і списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг роботи складає 112 сторінок, в тому числі 109 сторінок друкованого тексту, 35 рисунків, 8 таблиць, список літературних джерел із 115 найменувань, один додаток на трьох сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір і актуальність напрямку досліджень, мета, завдання і методи досліджень, наукова новизна та практичне використання результатів дисертаційної роботи, показано особистий внесок пошукача та відомості про апробацію результатів досліджень.

У першому розділі розглянута ефективність використання сталей підвищеної міцності в будівництві, показано, що підвищення міцності металу дає змогу знизити вагу металоконструкцій, підвищити технологічність за рахунок монтажу укрупненими елементами, скоротити обсяг зварювальних робіт у загальному часі будівництва об'єкта.

У ході аналізу літературних джерел встановлено, що найефективніше використовуються сталі підвищеної та високої міцності в елементах, що працюють на розтяг і згин.

Описані способи отримання гарячекатаного металу та поліпшення механічних властивостей будівельних сталей, наведена класифікація сталей, що використовуються у будівництві. Проаналізовані низьковуглецеві низьколеговані сталі підвищеної та високої міцності, що використовуються

при виготовленні будівельних металевих конструкцій. Показано, що із сталей вітчизняного виробництва перспективними для використання в великопрольотних та багатопверхових будівельних металоконструкціях є сталі, що в теперішній час використовуються для виготовлення труб великого діаметра магістральних нафто- та газопроводів. Здійснено аналіз технологій виробництва вітчизняних сталей даного типу і описані основні режими термічної обробки, як з прокатного, так і з окремого нагріву, які дозволяють значно збільшити комплекс експлуатаційних характеристик маловуглецевих низьколегованих сталей. Суттєвим недоліком сталей цього класу є наявність в них перлітної смугастості та пов'язаної з цим анізотропії механічних властивостей. Аналіз літературних джерел показує, що сталі такого класу могли б успішно використовуватись при виготовленні будівельних металоконструкцій за умов зниження анізотропії механічних властивостей готового прокату.

**У другому розділі** подані матеріал і методика дослідження. Використовувався лист товщиною 18 мм, вироблений на ММК ім. Ілліча за технологією контрольованої прокатки, та темплети сталі 10Г2ФБ такого хімічного складу: С–0,10%; Мn–1,83%; Si–0,18%; S–0,005%; P–0,015%; Ti–0,23%; Мо–0,006%; V–0,088%; Nb–0,022, %.

У роботі використовувались такі методи досліджень: металографічні з використанням металографічного мікроскопа „Неофот-2” та напівавтоматичного аналізатора структури „Епиквант”; електронномікроскопічні з використанням дифракційного електронного мікроскопа EM-125K; рентгеноструктурні дослідження за допомогою рентгенівського дифрактометра загального призначення ДРОН 4-07; мікрорентгеноспектральний аналіз з використанням установки Comeka MC/46.

Механічні властивості зразків на розтяг визначились на універсальній випробувальній машині FP-100/1 згідно з ГОСТ1497-84. Ударну в'язкість досліджуваного матеріалу визначали за допомогою механічного копра 2130KM-03 згідно з ГОСТУ9454-78. Для визначення механічних властивостей у перпендикулярному до площини листа напрямку була застосована методика мікромеханічних випробувань Фрідмана.

**У третьому розділі** описані результати досліджень зеренної структури аустеніту в сталі 10Г2ФБ за кінцевою ферито-перлітною структурою. Для порівняння наведені результати розрахунків розмірів зерен аустеніту для низьковуглецевих низьколегованих сталей аналогічного класу зарубіжного виробництва, що використовуються у будівництві.

Для оцінки розмірів зерен аустеніту розроблена нова методика визначення розміру зерна аустеніту за кінцевою ферито-перлітною структурою металу, яка базується на оцінці відстані між центрами перлітних смуг. Середній розмір аустенітного зерна розраховували виходячи із таких припущень: відсутність різнозернистості, форма зерен аустеніту куляста.

Середня відстань між центрами перлітних колоній дорівнює середньому розміру кристала аустеніту, оскільки перлітні колонії розташовуються в центрі колишніх аустенітних зерен.

Таким чином середній розмір перерізу аустенітних зерен розраховувався за рівнянням (1):

$$\pi r_{\text{cp}}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N \pi r_n^2}{N}, \quad (1)$$

де:  $\pi r_{\text{cp}}^2$  – площа центрального перерізу кулястого зерна;  
 $\pi r_n^2$  – площі перерізів, паралельних центральному;  
 $r_n$  – радіус n-го перерізу зерна.

Останній переріз має нульову площу, оскільки утворений площиною, що торкається поверхні кулі, при цьому всі перерізи розміщені на однаковій відстані між собою (рис.1).

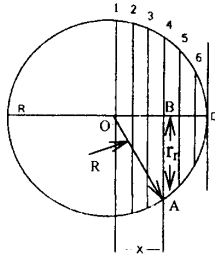


Рис. 1. Сліди перерізів кулястого зерна аустеніту різними площинами

Множимо чисельник і знаменник правої частини виразу (1) на величину  $\frac{R}{N}$ , де R – радіус кулі, N – кількість перерізів, і отримуємо:

$$\pi r_{\text{cp}}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N \pi R / N r_n^2}{N \frac{R}{N}} = \frac{\sum_{n=1}^N \pi r_n^2 R / N}{R}. \quad (2)$$

З трикутника AOB (рис.1) видно, що

$$r_n^2 = R^2 - x^2. \quad (3)$$

При  $N \rightarrow \infty$  чисельник виразу (2) переходить в інтеграл

$$\int_0^R \pi r_n^2 dx. \quad (4)$$

Підставляючи вираз (3) в інтеграл (4) з (2), отримуємо:

$$\pi r_{\text{cp}}^2 = \frac{\int_0^R \pi (R^2 - x^2) dx}{R} = \frac{\pi \int_0^R R^2 dx - \pi \int_0^R x^2 dx}{R} = \frac{\pi R^3 - \frac{1}{3} \pi R^3}{R} = \frac{2}{3} \pi R^2. \quad (5)$$



Із цього витікає, що  $\pi r_{cp}^2 = \frac{2}{3} \pi R^2 \Rightarrow r_{cp} = R \sqrt{\frac{2}{3}} \approx 0,8164R$ .

З іншого боку, найбільш імовірний переріз проходить через середину радіуса (рис. 1), тоді радіус кола імовірного перерізу  $r_0$  дорівнює

$$r_0 = \sqrt{R^2 - \left(\frac{R}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{3}{4}} R \approx 0,866R. \quad (6)$$

Ці розрахунки показують, що радіуси середнього і найбільш імовірного перерізів близькі і відрізняються один від одного на 6%. Таким чином, структури можна представити у вигляді кулястих перерізів радіусом  $0,8164R$  (де  $R$  – середній радіус апроксимованого кулею зерна аустеніту), тоді відстань між центрами перерізів аустенітних зерен на шліфі припускаємо рівною середньому розміру зерна.

Відповідно до прийнятого припущення, після гарячого прокатування зі ступенем деформації  $\varepsilon\%$ , кругові перерізи зерен аустеніту на поздовжньому шліфі перетворюються на еліпси. Мала вісь еліпса  $\sigma$  пов'язана з діаметром перерізу вихідного зерна, що дорівнює  $2R \cdot 0,8164$ , таким співвідношенням:

$$\varepsilon = \frac{2R \cdot 0,8164 - \sigma}{2R \cdot 0,8164}, \text{ откуда } \sigma = 2R \cdot 0,8164 - \varepsilon 2R \cdot 0,8164 = 2R \cdot 0,8164(1 - \varepsilon). \quad (7)$$

Відповідно до зроблених припущень мала вісь емпіричного перерізу повинна дорівнювати відстані між центрами аустенітних зерен. Таким чином, змірявши середню відстань між перлітними смугами і знаючи ступінь деформації при гарячому прокатуванні, можна розрахувати середній розмір колишніх аустенітних зерен за допомогою рівняння

$$2R = \frac{l}{0,8164(1 - \varepsilon)}, \quad (8)$$

де  $l$  – середня відстань між перлітними смугами.

З метою перевірки працездатності запропонованої методики оцінки середнього розміру зерна аустеніту низьковуглецевих низьколегованих сталей різних виробників, було здійснено порівняльний аналіз з існуючими методиками визначення середнього розміру зерен аустеніту і отримана гарна збіжність результатів.

За запропованою методикою був розрахований середній розмір аустенітного зерна для вітчизняної сталі 10Г2ФБ і деяких сталей зарубіжного виробництва, мікроструктури яких наведено на рис. 2.

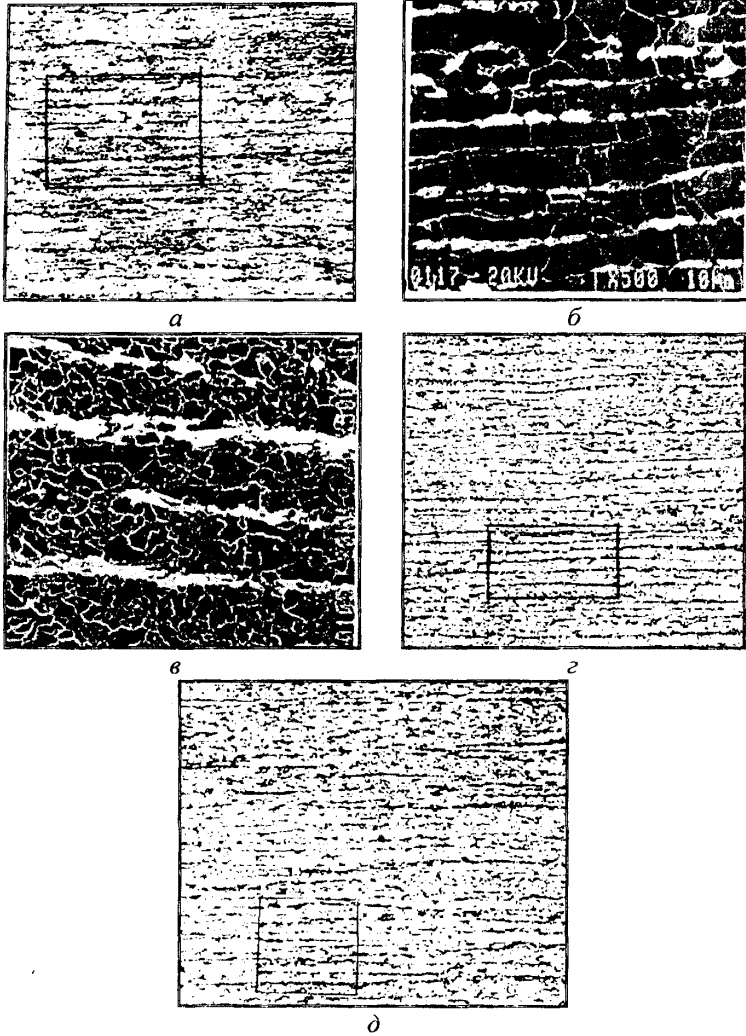


Рис. 2. Мікροструктура досліджуваних сталей: *а*– виробництва України ( $\times 100$ ); *б* – S200 виробництва Франції ( $\times 500$ ); *в* – S550 виробництва Франції ( $\times 500$ ); *г*– виробництва Італії ( $\times 100$ ); *д*– виробництва Німеччини ( $\times 100$ )

Параметри розмірів зерен аустеніту розраховані за розробленою методикою узагальнено і наведені в табл.1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика розмірів аустенітних зерен досліджених марок сталі

Країна-виробник	Відстань між перлітними смугами, мкм	Середній розмір зерна аустеніту, мкм
Італія	8,6	32,2
Франція (S550)	36	132,3
Франція (S200)	19	66
Німеччина	6,5	24,6
Україна	9	33

Аналіз наведених результатів (табл.1) показує, що середній розмір зерна аустеніту сталі 10Г2ФБ вітчизняного виробництва аналогічний розмірам зерен аустеніту більшості досліджуваних сталей, які широко використовуються за рубежом для виготовлення будівельних металоконструкцій.

У четвертому розділі наведені результати механічних випробувань у трьох напрямках товстолистової сталі 10Г2ФБ в стані поставки та після різних обробок. Зразки для механічних випробувань вирізалися таким чином, щоб виключити вплив зони вісєвої ліквації. Про анізотропію механічних властивостей можна судити з табл. 2.

Таблиця 2

Механічні властивості сталі 10Г2ФБ в стані поставки

Марка сталі, виробник	Відбір зразків для механічних випробувань	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	Ударна в'язкість КСВ, Дж/см <sup>2</sup>	
						+20°C	-40°C
						10Г2ФБ, ВАТ "ММК ім. Ллліча"	у Z-напрямку
	у напрямку прокатування	600	520	25	70	145	98
	у напрямку поперек прокатування	615	530	26	72	140	95

З наведених у табл. 2 даних витікає, що в напрямку, перпендикулярному до площини листа, комплекс механічних властивостей значно нижчий, ніж у напрямку прокатування і в напрямку, поперечному прокатуванню.

Наявність анізотропії властивостей пов'язана перш за все з утворенням перлітної смугастості в структурі сталі 10Г2ФБ після контрольованого прокатування.

Розтяг зразка, вирізаного вздовж нормалі до листа, характеризується виникненням і розвитком пор практично тільки в перлітних смугах, при цьому перлітні смуги стають розмитими і не набувають рядкового характеру (рис. 3 а). При розтягу зразків, вирізаних у напрямку вздовж і поперек напрямку прокатування, перлітні смуги набувають рядкового характеру (рис. 3 б, в).

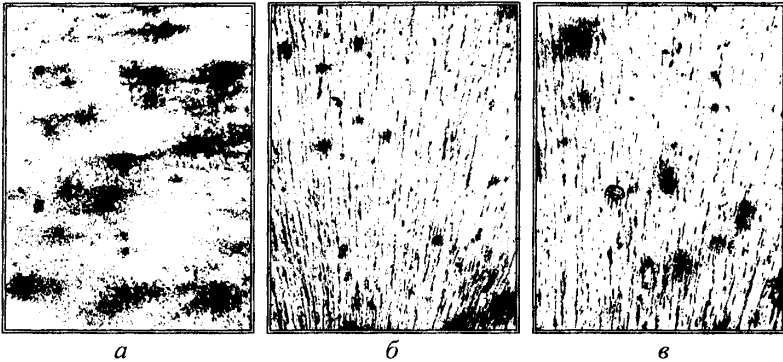


Рис. 3. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ: а – в Z- напрямку ( $\times 500$ ); б – в напрямку прокатування ( $\times 50$ ); в – в напрямку поперек прокатування ( $\times 50$ )

Слід відзначити, що при розтягу в площині прокатування пори не зосереджуються в перлітних смугах.

Мікроструктура сталі 10Г2ФБ в стані поставки приведена на рис. 4 а.

З метою моделювання у лабораторних умовах температурно-деформаційних режимів, а також процесів, що відбуваються під час гарячої пластичної деформації в потоці прокатного стану, темплети сталі 10Г2ФБ були оброблені за таким режимом: нагрів до  $1150^{\circ}\text{C}$ , витримка 4 години, підстижування до  $950^{\circ}\text{C}$ , деформація одновісним стисненням з  $\varepsilon = 60\%$  одночасним охолодженням до температури  $750^{\circ}\text{C}$ , з наступним охолодженням у масло, мікроструктура зразка сталі 10Г2ФБ, оброблена за пропонованим режимом, наведена на рис. 4 б.

Одновісне стиснення було використане для більш точного повторення в лабораторних умовах температурних режимів гарячої пластичної деформації металу, що застосовуються в заводських умовах.

Характерною особливістю мікроструктури сталі, обробленої за пропонованим режимом, є практично повна відсутність перлітної смугастості. Замість протяжних перлітних смуг, характерних для структури сталі 10Г2ФБ після контрольованого прокатування, спостерігаються перлітні утворення з відношенням довжини до товщини не більш 3:1, в той час, як у заводському металі це відношення дорівнює 9:1.

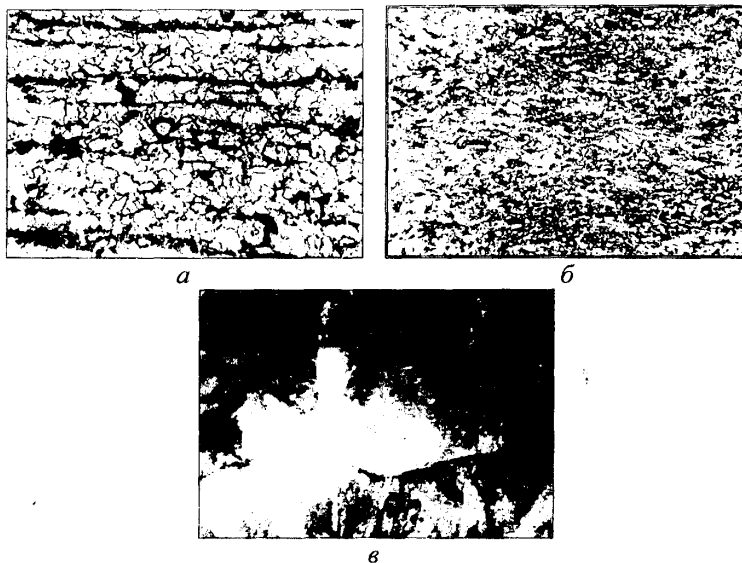


Рис. 4. Мікроструктура сталі 10Г2ФБ: а– в стані поставки ( $\times 500$ ); б– після додаткової термічної обробки ( $\times 500$ ); в– тонка структура ( $\times 25000$ )

Дослідження тонкої структури сталі 10Г2ФБ після проведеної термічної обробки виявило, що структура металу в переважній більшості характеризується поліедричним феритом (рис. 4 в).

Результати механічних випробувань сталі 10Г2ФБ після проведеної термічної обробки наведені в табл. 3.

Таблиця 3  
Механічні властивості сталі 10Г2ФБ після ТО

Марка сталі, спосіб обробки	Відбір зразків для механічних випробувань	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	Ударна в'язкість КСВ, Дж/см <sup>2</sup>	
						+20°C	-40°C
10Г2ФБ після лабораторної гарячої деформації	у Z-напрямку	754	662	27	72	155	105,9
	у напрямку прокатування	763	656	28	71	157	100,2
	у напрямок поперек прокатування	760	690	26	75	156	94,1

Аналіз даних таблиць 2 і 3 показує, що зниження перлітної смугастості підвищує механічні властивості сталі 10Г2ФБ в Z-напрямку, що пов'язано з підвищеною дисперсністю зерен фериту та перлітних колоній.



Для дослідження впливу виробничих факторів на анізотропію властивостей сталі 10Г2ФБ в лабораторних умовах було спровоковано ріст крупних зерен аустеніту, який у заводських умовах відбувається на стадії транспортування між станами чорнової і чистої прокатки.

Зразки, оброблені за запропонованою вище схемою, зі структурою наведеною на рис. 4 б, піддавали додатковому нагріву до температур 950...1050°C, витримці від 2...8 хв. з наступним гартуванням у воду. Мікроструктура сталі, обробленої за додатковим режимом, наведена на рис. 5.



Рис. 5. Мікроструктура зразка сталі 10Г2ФБ, після 8-хвилинної витримки при температурі 950°C ( $\times 500$ )

Аналіз структури показує, що після ізотермічної витримки протягом 8 хвилин при температурі 950 і 1050°C окремі зерна аустеніту можуть набувати розміру значно більшого, ніж інші.

Ріст невеликої кількості крупних зерен аустеніту при переважній більшості дрібних, що оточують ці кристали, створює сприятливі умови для дії механізму вторинної рекристалізації.

Утворення окремих крупних зерен аустеніту можливе в місцях ліквідаційної неоднорідності по марганцю, що спричиняє утворення перлітної смугастості.

Для перевірки цього припущення були проведені мікрорентгеноспектральні дослідження зразків сталі 10Г2ФБ, вирізаних із темплетів, що піддавались наведеним термічним обробкам, а також зразка, який піддавався додатковій витримці при температурі 950°C протягом 30 хвилин з наступним охолодженням разом із піччю. Результати проведених досліджень показані на рис. 6. Аналіз даних підтверджує наявність ліквідаційної неоднорідності по марганцю.

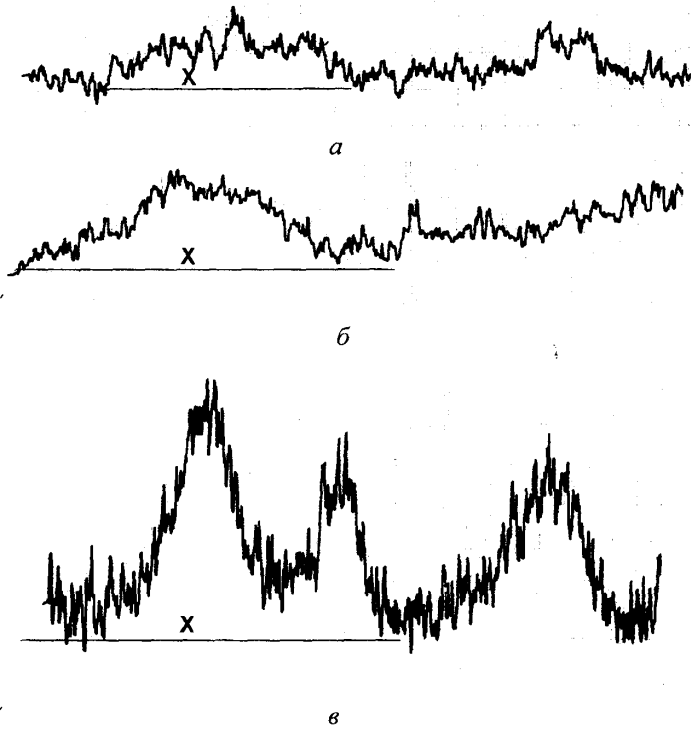


Рис. 6. Розподіл марганцю в зразку сталі 10Г2ФБ після гомогенізації при температурі 1050°C протягом 4 годин: *a* – гартування у воду; *б* – гартування у воду, нагрів до температури 950°C, витримка 30 хв., стиснення 60%, гартування в масло; *в* – додатковий нагрів до 950°C, витримка протягом 0,5 години, охолодження разом із піччю (X – лінія мінімальної концентрації вуглецю)

Результати рентгеноструктурних досліджень зразків сталі 10Г2ФБ після проведених термічних обробок наведені на рис. 7.

Аналіз наведених даних свідчить, що зниження кількості перліту після проведеної обробки пов'язане з утворенням твердого розчину вуглецю в фериті. Нагрівання зразків за відсутності перлітної смугастості протягом 0,5 години при температурі 950°C спричинило вихід вуглецю з твердого розчину з утворенням перлітної смугастості і зменшенням параметра решітки фериту (рис. 7 б).

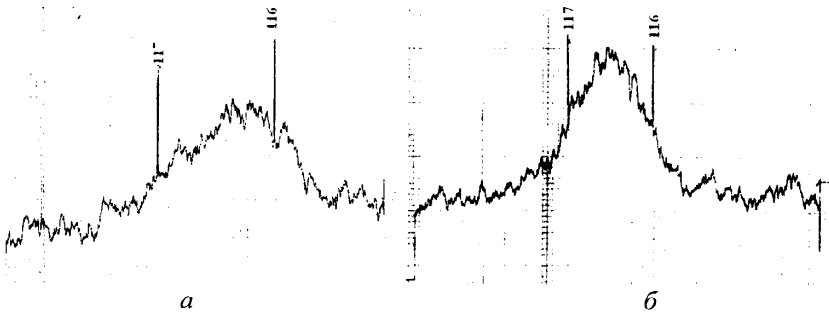


Рис. 7. Дифрактограма зразків сталі 10Г2ФБ: *а* – після запропонованого режиму обробки; *б* – те ж із додатковим відпалом протягом 0,5 години при температурі 950°C

Таким чином, результати проведених досліджень показують, що обробка темплетів сталі 10Г2ФБ за режимом: гомогенізація при 1150°C протягом 4 годин, деформація  $\epsilon = 60\%$  при температурі 950°C з одночасним охолодженням до 750°C, з подальшим охолодженням у маслі, дозволяє уникнути утворення ліквацийної неоднорідності в  $\frac{1}{4}$  частині листа за рахунок отримання дрібнішого зерна аустеніту. Як наслідок, у сталі відсутня перлітна смугастість і спостерігається задовільний комплекс механічних властивостей, особливо в Z- напрямку.

На основі проведених досліджень, за визначенням кінетики росту зерна аустеніту після виходу металу з чорнової кліті і експериментів, направлених на зниження перлітної смугастості, були запропоновані для дослідно-промислової прокатки в заводських умовах сталі 10Г2ФБ наступні технологічні схеми. Перша відрізняється від традиційної на заводі сороченням часу транспортування металу між станами чорнової і чистової прокатки до 1...2 хвилин за рахунок додаткового примусового охолодження від 1050...750°C, що дозволить підвищити механічні властивості за рахунок запобігання розвитку механізму вторинної рекристалізації аустеніту і отримання більш дрібного зерна фериту. Друга, відрізняється примусовим охолодженням від температури 950...900°C, чистовим прокатуванням при цій температурі і наступним примусовим швидкісним охолодженням з метою підвищення механічних властивостей листового металопрокату за рахунок отримання структур мартенситу, бейніту або голчастого фериту.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел показав, що за кордоном найефективніше використовуються сталі підвищеної і високої міцності в елементах, які працюють на розтяг та згин.

2. Встановлено, що із сталей вітчизняного виробництва перспективними для використання в великопрольотних та багатоповерхових

будівель є сталі, які використовуються в теперішній час для виготовлення труб великого діаметра та з'єднувальних деталей магістральних нафто - газопроводів.

3. Розроблена нова методика оцінки середнього розміру зерна аустеніту шляхом вимірювання середньої відстані між перлітними смугами готового прокату з низьковуглецевих мікролегованих сталей.

4. Порівняння отриманих середніх значень величини зерна аустеніту показало, що сталь виробництва ОАО "ММК ім. Ілліча" поступається більшості зарубіжних зразків, отже, зменшення зерна аустеніту в цій сталі є резервом поліпшення її механічних властивостей.

5. Показано, що після гомогенізації сталі 10Г2ФБ при температурі 1150°C протягом 4 годин сегрегація марганцю незначна, додаткове нагрівання до температури 950°C з витримкою 30 хвилин, деформацією на 60% з наступним гартуванням у маслі підвищує ступінь сегрегації марганцю, а після додаткового нагрівання до температури 950°C з витримкою 0,5 години і охолодження разом із пічню сегрегація марганцю стає яскраво вираженою, а марганець зосереджується, в основному, в перлітних смугах.

6. Встановлено, що в сталі 10Г2ФБ при розтягуванні в напрямку, перпендикулярному до площини листа, у перлітних смугах виникають пори, розвиток яких є причиною пониженої міцності і пластичності в цьому напрямку. При розтягуванні сталі 10Г2ФБ промислового виробництва в напрямках, що лежать у площині листа, переважного виникнення пор у перлітних смугах не спостерігається.

7. Лабораторна гаряча деформація сталі 10Г2ФБ оброблена за режимом: нагрів до температури 1150°C, витримка 4 години, підстиження до 950°C, деформація одновісним стисненням з  $\epsilon = 60\%$  з одночасним охолодженням до температури 750°C з наступним охолодженням у масло, дозволила значно знизити утворення перлітної смугастості та отримати феритно-перлітну структуру з середнім розміром зерен менше 5 мкм і високими ізотропними механічними властивостями.

8. Установлено, що зменшення кількості перліту зі зменшенням розмірів зерен фериту пов'язане з утворенням твердого розчину вуглецю в фериті.

9. На основі проведеного комплексу досліджень, а також аналізу їх результатів розроблені і запропоновані технологічні схеми виробництва товстого листа із сталі 10Г2ФБ, включаючи отримання дрібного зерна аустеніту, та, відповідно, фериту і колоній перліту. Ці технологічні схеми запропоновані для дослідно-промислової прокатки на обладнанні металургійних заводів України.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютерев И. А., Хоменко Ю. И., Саркиц И.Г., Василенко Т.С. Методика измерения среднего размера аустенитного зерна по структуре горячекатаных микролегированных сталей // Металознавство та термічна обробка металів. — 2001.— № 2. — С. 4–10. (здобувач запропонував новий спосіб оцінювання середнього розміру аустенітних зерен перед останньою гарячою прокаткою мікролегованих сталей з ферито-перлітною структурою).

2. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютерев И. А., Хоменко Ю.И., Саркиц И.Г., Буньковская Т.В. Измельчение зерна аустенита и феррита стали 10Г2ФБ // Металознавство та термічна обробка металів. — 2001. — №4. — С. 4–10. (здобувач експериментально показав, що у сталі 10Г2ФБ можливо отримати несмугасту ферито-перлітну структуру з розміром зерна фериту та перліту до 5 мкм; встановив, що при зменшенні зерна аустеніту менше 8 мкм спостерігається зменшення кількості перліту нижче розрахованого за хімічним складом сталі 10Г2ФБ (12,5%)).

3. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютерев И. А., Хоменко Ю. И. Новый механизм торможения роста зерна феррита в микролегированных сталях // Перспективные задачи инженерной науки: Сб. науч. трудов. — Вып. 3. / Под общ. ред. акад. МИА, д.т.н., проф. В.И. Большакова. — Днепропетровск: GAUDEAMUS. — 2002. — С. 112–116. (здобувач запропонував новий механізм затримання росту феритних зерен у низьковуглецевих сталях за рахунок утворення мікросмуг перліту в процесі гарячої пластичної деформації; знайдено новий ефект зменшення кількості перліту в низьковуглецевих сталях при зменшенні зерна фериту; експериментально довів можливість подрібнення зерна аустеніту в сталі 10Г2ФБ менше 6 мкм).

4. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютерев И. А., Хоменко Ю. И., Фролкова О.Н. Природа перлитной полосчатости в низкоуглеродистых сталях // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. — Вып. 27. Ч. 2 / Под общ. ред. д.т.н., проф. В. И. Большакова. — Днепропетровск: ПГАСА.— 2004. — С. 167. (здобувачем розглянуті механізми утворення перлітної смугастості, виявив призупинення перлітної реакції при подрібненні феритних зерен у сталі 10Г2ФБ).

5. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютерев И. А., Хоменко Ю. И. Изменение структуры толстолистовой стали 10Г2ФБ при растяжении // Металознавство та термічна обробка металів.— 2004.— № 2–3.— С. 76 – 79. (здобувачем проведено дослідження мікроструктури товстолистової сталі 10Г2ФБ, що піддавалась деформації розтягненням у напрямку нормалі до площини листа; виявив підвищену текучість металу у місцях, де перлітна смуга не доходить до бокової поверхні зразка; виявив, що найбільше утворення пор утворюється в перлітних смугах, які разом із місцевим звуженням можна вважати основною причиною низьких механічних властивостей сталі 10Г2ФБ у напрямку нормалі до площини листа,



отриманого контрольованою прокаткою).

6. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютюрев И. А., Хоменко Ю. И., Фролкова О.Н. Вторичная рекристаллизация как причина перлитной полосчатости стали 10Г2ФБ // Металлознание та термічна обробка металів.– 2004. – № 4. – С. 42 – 46. (здобувач шляхом лабораторного моделювання процесу гарячої прокатки товстого листа сталі 10Г2ФБ підтвердив можливість росту крупного зерна аустеніту в цій сталі у процесі транспортування раскатів литих слябів між станами чорнової та чистої прокатки на металургійних заводах).

7. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютюрев И. А., Хоменко Ю. И. Особенности формирования перлитной полосчатости в толстолистовой стали 10Г2ФБ // Металлознание та термічна обробка металів. – 2005. – № 1. – С.15–25. (здобувачем показано, що у процесі охолодження розпад аустеніту відбувається за рахунок зародження кристалів фериту на границях зерен аустеніту та росту їх вглиб аустенітного кристалу з відтісненням вуглецю до його центру).

8. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютюрев И. А., Хоменко Ю. И., Фролкова О.Н. Перлитная полосчатость и анизотропия механических свойств толстолистовой стали 10Г2ФБ // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Вып. 32. Ч.1. /Под общ. ред. д.т.н., проф. В.И. Большакова. – Днепропетровск: ПГАСА.– 2005. – С. 244 – 252. (здобувач розробив методику дослідження анізотропії механічних властивостей листової сталі товщиною 18 мм та більше методом мікромеханічних випробувань).

9. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютюрев И. А., Спильник А. Я. Изменение параметра решетки феррита при устранении перлитной полосчатости в стали 10Г2ФБ // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Вып. 36. Ч.3. /Под общ. ред. д.т.н., проф. В. И. Большакова. – Днепропетровск: ПГАСА.– 2006. – С. 153–162. (здобувач шляхом рентеноструктурних досліджень показав, що у процесі гарячої пластичної деформації у сталі 10Г2ФБ можливе розчинення вуглецю за типом впровадження, про що свідчить збільшення параметру решітки фериту більше, ніж на 0,0004 нм).

10. Большаков В. И., Воробьев Г. М., Тютюрев И. А., Хоменко Ю.И. Изменение микроструктуры стали 10Г2ФБ при скоростном нагреве и охлаждении в процессе сварки // Теория и технология процессов пластической деформации - 2004: Тезисы докладов. /МИСиС, Москва.– 2004. – С. 219-221. (здобувач розробив методику дослідження анізотропії механічних властивостей листової сталі товщиною 18 мм та більше методом мікромеханічних випробувань).

## АНОТАЦІЯ

**Тютєрев І. А. Підвищення механічних властивостей сталі 10Г2ФБ усуненням перлітної смугастості. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпропетровськ, 2007.

Дисертаційна робота спрямована на підвищення міцнісних і пластичних властивостей сталі 10Г2ФБ особливо в Z- напрямку, за рахунок удосконалення структури металу. Показана ефективність використання сталей підвищеної міцності у будівництві. Запропонована нова методика визначення середніх розмірів зерна аустеніту за відстанню між перлітними смугами. Лабораторні дослідження засвідчили, що перлітна смугастість при виробництві товстолистої сталі 10Г2ФБ пов'язана з ростом крупних зерен аустеніту при транспортуванні заготовки між станами чорнової і чистої прокатки. Для усунення перлітної смугастості використана безперервна гаряча пластична деформація у сполученні з охолодженням, яка дала можливість подрібнити зерна фериту і перліту до величини 5 мкм. При цьому спостерігалось трикратне зменшення кількості фериту у ферито-перлітній структурі. Усунення перлітної смугастості дозволило отримати міцні і пластичні властивості в Z-напрямку на рівні:  $\sigma_b = 763 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_T = 656 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 28\%$ ,  $\psi = 71\%$ , тобто значно зменшити анізотропію механічних властивостей сталі 10Г2ФБ, що піддавалася гарячій пластичній деформації. Для усунення перлітної смугастості і підвищення міцнісних і пластичних властивостей сталі 10Г2ФБ в умовах виробництва запропоновані нові технологічні схеми виготовлення товстого листа сталі цієї марки.

Ключові слова: механічні властивості, смугастість, анізотропія властивостей, зміцнення, ліквіація, розмір зерна.

## АННОТАЦИЯ

**Тютєрев И. А. Повышение механических свойств стали 10Г2ФБ устранением перлитной полосчатости. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепропетровск, 2007.

Диссертационная работа имеет цель улучшения комплекса механических свойств стали 10Г2ФБ особенно в Z – направлении за счет совершенствования структуры металла.

**Во введении** обоснована актуальность, показана научная новизна и практическая ценность работы, дана общая характеристика диссертации.

**В первом разделе** проведен анализ литературных источников, посвященных тематике исследований. Показана эффективность использования сталей повышенной прочности в строительстве. Проанализированы схемы термической и термомеханической обработок проката из низкоуглеродистых низколегированных сталей.

**Во втором** разделе приведены использованные в работе методы исследования металла.

**В третьем разделе** представлены результаты исследований зеренной структуры аустенита стали 10Г2ФБ формирующейся после конца черновой прокатки. Для сравнения приведены результаты расчетов размеров зерен аустенита для низкоуглеродистых низколегированных сталей зарубежного производства, широко используемых в строительстве.

Для оценки размеров зерен аустенита в работе разработана новая методика определения зерна аустенита по конечной феррито-перлитной структуре листового металлопроката, основанная на оценки расстояния между центрами перлитных полос.

**В четвертом разделе** приведены результаты механических испытаний толстолистовой стали 10Г2ФБ в состоянии поставки и после различных обработок.

Методом микромеханических испытаний установлено, что в Z-направлении пределы текучести и прочности значительно меньше, чем в направлениях, параллельных плоскости листа.

Металлографически показано, что вблизи места разрыва микрообразцов, испытанных на растяжение в Z-направлении, перлитные полосы размываются по ширине и насыщаются порами, с чем связывается пониженная прочность и пластичность в этом направлении.

Лабораторными опытами показано, что анизотропия свойств при производстве толстолистовой стали 10Г2ФБ связана с ростом крупных зерен аустенита при транспортировке заготовки между станами черновой и чистой прокатки и как следствие перлитной полосчатостью.

Для устранения перлитной полосчатости использована непрерывная горячая пластическая деформация в сочетании с охлаждением, которая позволила измельчить зерна феррита и перлита до величины менее 5 мкм. При этом наблюдалось трехкратное уменьшение количества феррита в феррито-перлитной структуре.

Методом микрорентгеноспектрального анализа показано, что высокая сегрегация марганца в перлитных полосах в производственной стали 10Г2ФБ связана с процессами, происходящими при  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении.

Рентгеноструктурным исследованием показано, что уменьшение общего количества перлита при такой горячей деформации связано с образованием твердого раствора углерода в феррите. Образование твердого раствора внедрения углерода в феррите, а также измельчение зерна феррита и перлита являются структурными факторами, с которыми связывается повышение прочностных и пластических свойств при устранении перлитной полосчатости по сравнению с теми же свойствами готовой стали промышленного производства.

Устранение перлитной полосчатости позволило получить прочностные и пластические свойства в Z-направлении на уровне  $\sigma_B = 763 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_T = 656 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 28\%$ ,  $\psi = 71\%$ , т. е. значительно снизить анизотропию механических свойств в стали 10Г2ФБ, подвергнутой горячей пластической деформации.

Для устранения перлитной полосчатости и повышения прочностных и пластических свойств стали 10Г2ФБ в производственных условиях предложены новые технологические схемы изготовления толстого листа стали этой марки.

Ключевые слова: механические свойства, перлитная полосчатость, анизотропия механических свойств, упрочнение, размер зерен.

## SUMMARY

**Tyuterev I.A. – The increasing of mechanical properties of steel 10Г2ФБ by means of pearlite stripes elimination. – Manuscript.**

Thesis for a degree of Ph.D. by speciality 05.02.01– material science. – Prydniprovsky State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipropetrovs'k 2007.

Thesis is directed at the increasing of strength and plasticity properties of steel 10Г2ФБ in the direction perpendicular to plane of the sheet (Z-direction) in particular. The efficiency of high strength steels' use at building was shown. New method of definition of average sizes of austenite grains according to their position between pearlite stripes was suggested. Laboratory tests had proved that existing of pearlite stripes at plate steel 10Г2ФБ production is connected with a growth of austenite coarse grains at the transportation of workpiece between rolling mills of rough and finishing rolling. For elimination of pearlite stripes the continuous hot plastic deformation followed by cooling was used. This method gave the possibility of ferrite and pearlite grains grinding up to the value of 5  $\mu\text{m}$ . The elimination of pearlite stripes allows us to obtain strength and plasticity properties at Z-direction of  $\sigma_b = 763\text{MPa}$ ,  $\sigma_t = 656\text{MPa}$ ,  $\delta = 28\%$ ,  $\psi = 71\%$ , i.e. to decrease noticeably the anisotropy of mechanical properties of steel 10Г2ФБ after the hot plastic deformation. For elimination of pearlite stripes and increase of strength and plasticity properties of steel 10Г2ФБ at the production process new technological schemes of plate steel production were suggested.

Key words: mechanical properties, pearlite stripes, anisotropy of properties, strengthening, segregation, grain's size.