

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

ДОНЕЦЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

ПАШИНСЬКА Олена Генріхівна

*Е.Пашин*

МЕХАНІЗМИ ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСУ ВЛАСТИВОСТЕЙ  
ДЕФОРМОВАНИХ МАЛОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Спеціальність 01.04.07 "Фізика твердого тіла"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на домагання вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Донець - 1994



00778432 (V)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Донецькому фізико-технічному інституті  
Національної Академії Наук України.

Науковий керівник - доктор фізико-математичних наук,  
професор ДАЦКО Олег Іванович.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
професор ПЛАТКОВ Валерій Яковлевич

доктор технічних наук,  
професор БАРАНОВ Олександр Олександрович

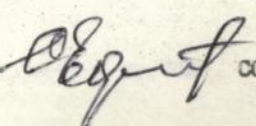
Будуча організація - Інститут чорної металургії НАН України

Заявка відбудеться "8" листопада 1994 р. в 1400 годин  
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 016.32.01 при  
Донецькому фізико-технічному інституті НАН України (340114,  
Донецьк-114, вул. Р.Лихосембург, 72)

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Донецького  
фізико-технічного інституту НАН України.

Анотераферат розіслано "4" листопада 1994 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради  СОЛОВЬОВ В.Е.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

У відповідності з існуючими науковими уявленнями, процеси формування комплексу механічних властивостей тісно зв'язані з характеристиками дислокаційної структури. Зовнішні енергетичні впливи можуть сприяти одержанню матеріалів з високим рівнем міцністних та пластичних характеристик. Але наслідком такого впливу є підвищення густини дислокацій і зміна їх просторового положення. Із загальної точки зору це підвищує термодинамічну нестійкість і вільну енергію системи. Наслідком цього є нестабільність основних характеристик матеріала.

В даній роботі питання формування і еволюції дислокаційної структури вивчалось стосовно низьколегованих маловуглецевих сталей, в яких ефект зміцнення досягається за рахунок особливої системи легування (малими кількостями карбід- та нітридоутворюючих елементів) у поєднанні з регламентованою деформаційною обробкою - контрольованою прокаткою.

Аналіз стану питання показує, що найбільш вичерпно вивчені питання структуроутворення сталей в процесі гарячої пластичної деформації при температурах 700-900 °C і в процесі подальшого прискореного охолодження до температур 500-550 °C. Відомо, що основні фазові перетворення в сталях завершуються при більш високих температурах, але і в цьому температурному інтервалі ще йдуть з помітною швидкістю процеси рекристалізації феритного зерна, відпочинку, повернення, виділення дисперсних часток. В той же час, ця група процесів, яка приводить до релаксації

внутрішніх напруг і перерозподілу дислокацій, вивчене в значній мірі менше.

Однак, сегрегації домішних атомів на дислокаціях повинні зашкодити подібному перерозподілу і тим інтенсивніше, чим більша ефективна концентрація азоту і вуглецю. Через це дуже ймовірно уявляється перебіг процесів деформаційного старіння при низьких температурах подібно тому, як це має місце в випадку холодної і теплої пластичної деформації. Детальне вивчення структурних змін при старінні стає особливо важливим, коли прийняти до уваги те, що товсті листи із сталей цього типу підлягають правленню, гнуттю та наступній зварці. Це веде до виникнення додаткових напруг та деформацій. Збільшення розмірів конструкцій і перетворення їх в моноліт роблять особливо важливим врахування небезпеки крихкого руйнування під впливом деформаційного старіння.

**МЕТА ПРАЦІ.** Основним завданням дисертації було вивчення фізичної природи механізмів, визначаючих особливості формування комплексу механічних властивостей малоперлітних низьколегованих сталей при гарячій пластичній деформації; вивчення процесів взаємодії твердого розчину, дислокацій, дисперсних виділень в низькотемпературному діапазоні, сінкка стійкості дислокаційної структури, установлення причин низького рівня пластичних характеристик.

**НАУКОВА НОВИЗНА** праці визначається результатами використання різних методик дослідження (структурної і кількісної металографії, рентгеноструктурного аналізу, амплітуднозалежного і амплітуднонезалежного внутрішнього

тертя, методів математичної статистики).

Одержані нові експериментальні дані, які дозволяють уточнити умови формування механічних властивостей мартенситних низьколегованих сталей типу 09Г2 з мікролегуючими домішками в процесі контрольованої прокатки як результат декількох фізичних процесів на структурному і субструктурному рівнях при температурах вище температур закінчення гарячої пластичної деформації.

Основну роль в формуванні рівня механічних властивостей відіграють динамічна та статична рекристалізація, а також процеси формування дислокаційної структури в окремих кристалітах фериту під час гарячої пластичної деформації при 700-900 °С. Показано, що на мікроструктурному рівні комплекс механічних властивостей сталей корелює з характеристиками частотної кривої розподілу зерен по розмірам. Вперше показано, що з пластичними характеристиками найбільш тісно зв'язані коефіцієнт асиметрії частотної кривої. Особливістю цих частотних кривих розподілу є реалізація бімодального розподілу.

Вперше показано, що вагомий внесок в рівень механічних властивостей досліджуваних сталей вносять процеси динамічного перерозподілу доміжних атомів у системі: твердий розчин-дисперсні карбонітриди-дислокації в низькотемпературній області 500-20 °С після закінчення гарячої пластичної деформації. Це приводить до зниження рівня пластичних властивостей.

Установлено, що стан дислокаційної структури низьковуглецевих сталей після деформації не є стабільним і в області температур 20-250 °С в сталях проходять процеси старіння,

які супроводжуються змінов енергії зв'язку дислокацій з частками і змінов довжини рухомих дислокацій. В результаті вивчення кінетики процесів старіння показано, що в сталях такого типу реалізується двостадійний процес розкладу перенасиченого твердого розчину. Показано, що перша стадія процесу старіння зв'язана з дифузійським атомів вуглецю і азоту, утворених на дислокаціях атмосфери і сегрегації. Друга стадія зв'язана з утворенням передвиділених карбідів та нітридів V, Nb, Ti на дислокаціях, оформленням виділень з втратою когерентності решітки та наступним їх ростом.

На основі систематичного вивчення спектрів внутрішнього тертя в амплітудозалежній та амплітуднезалежній областях в діапазонах 1 Гц,  $10^5$  Гц,  $10^7$  Гц вперше встановлено, що параметри  $Q^{-1}$  характеризують ступінь завершеності процесів старіння низьковуглецевих мікролегованих сталей після гарячої пластичної деформації.

**НАУКОВО-ПРАКТИЧНА ЗНАЧИМІСТЬ.** Проведені в дисертації дослідження розширюють уяву про фізичну природу механізмів формування властивостей мідності та пластичності легованих сталей в процесі гарячої пластичної деформації. Розвинуті в праці уяви про нестабільність дислокаційної структури в низькотемпературній області (20-250 °C) і дані про перебіг в цьому інтервалі температур процесів виділення надлишкових фаз можуть бути перенесені на інші металічні матеріали, до яких застосовується високотемпературна обробка, в результаті якої формується субструктура з підвищеною густиною дислокацій.

В процесі роботи знайдені кількісні характеристики мікроструктури сталей, які можуть бути використані для оцінки їх якості в умовах виробництва.

## ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ, ЯКІ ВИНОСЯТЬСЯ НА ЗАХИСТ:

1. Настабільність тонкої структури маловуглецевих низьколегованих сталей в низькотемпературній області (20-500 °С) після закінчення гарячої пластичної деформації, яка проявляється в динамічному перерозподілі домішних атомів в системі: твердий розчин-дисперсні частини-дислокації.

2. Наявність процесу старіння при нагріванні від 20 до 250 °С, який проходить через дві стадії. Двостадійність процесу старіння: перша стадія процесу старіння пов'язана з дифузиею атомів С і N, створюючих на дислокаціях атмосфери і сегрегації. Друга стадія полягає в створенні передвиділень карбідів та нітридів V, Nb, Ti на дислокаціях, оформленні виділень з втратою ними когерентності і подальшим їх ростом.

3. Особливості статистичних характеристик частотних кривих розподілу зерен фериту по розмірам та їх взємозв'язок з комплексом механічних властивостей.

4. Результати статистичного аналізу значимості впливу технологічних параметрів виробництва, хімічного складу і кількісних характеристик мікроструктури на спостережувану варіацію комплексу механічних властивостей.

АПРОБАЦІЯ ПРАЦІ. Матеріали дисертації доповідались на Всесоюзному семінарі "Пластична деформація матеріалів в умовах зовнішніх енергетичних впливів" (м. Новокузнецьк, 1991 р.); Всесоюзній науково-технічній конференції молодих вчених, інженерів "Створення і освоєння ресурсозберігаючих технологій в чорній металургії" (м. Донецьк, 1991 р.); VIII Всесоюзній нараді по взаємодії між дислокаціями і атомами домішок та властивостями сплавів" (м. Тула, 1991 р.); Семінарі

"Структура і властивості легованих сталей" (м. Київ, 1992 р.); VI семінарі за участь іноземних спеціалістів "Структура дислокація і механічні властивості металів і сплавів" (м. Сєвєродонецьк, 1993 р.)

**ПУБЛІКАЦІЇ.** Основний зміст дисертації опублікований в 7 друкованих працях, перелік яких наводиться в кінці автореферату.

**СТРУКТУРА І ОБ'ЄМ ДИСЕРТАЦІЇ.** Дисертація складається із вступу, 3 розділів, загальних висновків, 5 додатків, переліку цитованої літератури в кількості 158 найменувань. Дисертація містить 43 малюнки, 7 таблиць, загальний об'єм - 176 сторінок машинописного тексту, з них основного 126 стор.

Освідчені положення, які виносяться на захист, були отримані особисто дисертантом.

#### ЗМІСТ ПРАЦІ

У вступній частині обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і цілі дослідження, наукова новизна, наукова та практична значимість результатів та приведені основні положення, які виносяться на захист.

В першому розділі розглянуто стан питання. Показано, що найбільш детально вивчені питання структуроутворення сталей в процесі гарячої пластичної деформації при температурах вище 700-900 °С. Але низькотемпературні процеси структурних змін в сталі після контрольованої прокатки вивчені недостатньо.

Другий розділ присвячений вибору об'єкта і методів дослідження. Матеріалом для дослідження були обрані маловуглецеві низьколеговані сталі типу 09Г2ФБ, 09Г2Б1 після

контрольовані прокатки. Досліджувані зрезки мали різний хімічний склад, різні технологічні параметри деформації і відрізнялись рівнем механічних властивостей. Досліджувались також аналогічні сталі виробництва фірм Німеччини, Австрії, Японії, Італії, Франції. Для проведення вимірів по внутрішньому терту використовувалось армко-залізо та хімічно чисте залізо. Матеріал використовувався як в викіденому стані, так і після відпалювання на протязі 2 годин при температурі 200–600 °С, а також в процесі штучного старіння при 180–220 °С тривалістю від 10 хвилин до 20 годин.

Для дослідження вищевказаних матеріалів застосовувались різноманітні методики: методи статистичного аналізу, структурна і кількісна металогія, виміри мікротвердості, рентгеноструктурний аналіз, виміри параметрів внутрішнього терту в амплитудозалежній та амплитудонезалежній областях виміру на частотах 1 Гц, 10<sup>5</sup> Гц, 10<sup>7</sup> Гц в інтервалі температур від -170 до +250 °С як в вакуумі (10<sup>-3</sup> мм.рт.ст.), так і на повітрі. Проводились визначення механічних властивостей відносноного видовження, ударної в'язкості, тимчасового опору, межі текучості.

В третьому розділі приведені результати наступних досліджень:

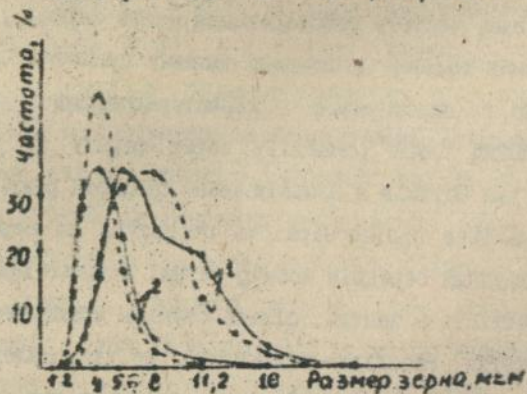
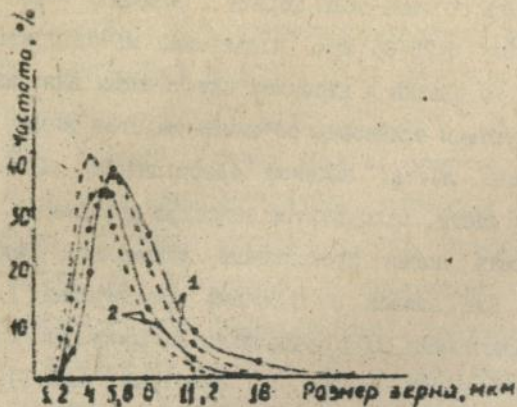
1. Бувчалась залежність механічних властивостей товстості листового прокату від його хімічного складу і технологічних параметрів виробництва методом множинного регресивного аналізу. Було розглянуто 420 різних плявок сталі. Накопичений масив статистичних даних був згрупований в окремі вибірки в залежності від марки сталі та завжди-виробника безлержеривно-литого слябу. Із вибірок виключались випадання і

виконувалась перевірка на відповідність закону нормального розподілу і відсутність взаємнокорельованих факторів. Були побудовані регресійні моделі I і II порядків для слідуючих механічних характеристик:  $\sigma_B, \sigma_{0.2}, \delta, KCV^{-15}, KCU^{-60}$ . Аналіз регресійних моделей першого порядку показав, що найбільш вагомими із групи карбідотворюючих елементів є Ti та Nb. В дослідженому інтервалі складів (в межах, обумовлених ТУ) для сталі 09Г2ФБ не відзначається позитивний вплив V на пластичні та в'язкісні характеристики. Для уточнення моделей виключили маловагомі фактори на основі аналізу моделей першого порядку і в модель вносились парні взаємодії C-V, C-Nb, C-Ti, N-Nb, N-Ti, N-V і інші. Виявилось, що рівняння другого порядку з більшою повнотою описує міцнісні властивості в порівнянні з пластичними. Найбільш значимими факторами, які обусловлюють пластичні властивості, є взаємодія C-Ti і C-Nb. Це вказує на необхідність більш повного дослідження процесів виділення карбідів, нітридів, карбонітридів в процесі прокатки металу, при подальшому його вилежуванні і при експлуатації, з метою виявлення причин нестабільності механічних властивостей сталі. Ці процеси можуть приходити як під час прокатки, в результаті одночасної взаємодії декількох механізмів змінення, так і на стадії остаточного формування структури після деформації.

2. Для перевірки припущення про можливий зв'язок нестабільності механічних властивостей з швидкістю проходження процесів динамічного повертання, рекристалізації, деформційного старіння була досліджена структура маловуглецевих низьколегованих сталей в зв'язку з рівнем їх механічних властивостей за допомогою методик кількісної металографії).

Визначалась об'ємна доля фериту і розподіл зерен по розмірам в діагнзоні 0.25–60 мкм. Кількісний металографічний аналіз показав, що плавки з високими пластичними властивостями характеризуються однаковим об'ємним вмістом фериту в центрі та у поверхні листа, високою однорідністю зерна ферита по перерізу листа, відсутністю текстури деформації. Це свідчить про досить повне проходження динамічної рекристалізації металу. Для плавки з високими пластичними і в'язкісними характеристиками спостерігається логарифмічно-нормальне розподілення зерен фериту по розмірам (мал.І). При цьому максимальну частоту спостереження мають зерна, у яких близький розмір вздовж та поперек напрямку прокатки. Для плавки з низькими пластичними характеристиками реалізується бімодальний закон розподілу зерен фериту по розмірам, що типово для металів з незакінченим процесом рекристалізації. Відзначається нерівномірність структури по перерізу листа: більш крупний середній розмір зерна; яскраво проявлена різнозернистість в центрі; більша ступінь витягнутості в напрямі прокатки. Необхідно відзначити, що для сталей типу 09Г2ФБ характерно більш крупне зерно, ніж для сталей типу 09Г2БТ, а також більший розбіг по розмірам в центрі і на поверхні. Це дозволяє припустити, що для сталей різних систем легування переважними виявляються різні механізми зміцнення: для сталей, легованих V і Nb це в основному субструктурне зміцнення, для сталей з Nb і Ti – зернограничне зміцнення.

Відповідно літературним даним, частотні криві розподілу зерен по розмірам в логарифмічних координатах повинні бути симетричними. Асиметрія, яка спостерігається в цьому випадку, ймовірно всього обумовлена суперпозицією двох



Мел. I Частотні криві розподілу зерна фериту по розмірам

- а - циларки з рівнем механічних властивостей  
краще обумовлених технічними умовами;  
б - циларки з рівнем механічних властивостей  
гірше обумовлених технічними умовами.  
1 - вздовж напрямку прокатки; 2 - поперек.  
— центр зразка; — поверхня зразка.

частотних кривих, відповідно для крупних і малих зерен. По вигляду одержані частотні криві розподілу можна розділити на 2 типи: з позитивним та негативним коефіцієнтом асиметрії. При чому зразки, котрі мають високі пластичні властивості, характеризуються негативним коефіцієнтом асиметрії. Позитивний коефіцієнт асиметрії спостерігається у плавок з низьким значенням відносного видовження і ударної в'язкості. Аналіз частотних кривих розподілу в напрямі, перпендикулярному напрямку прокатки показав, що і на них теж спостерігаються виявлені закономірності. Вивчення мікроструктури дозволило підтвердити припущення про зв'язок нестабільності механічних властивостей із ступенем проходження процесів наклепування, динамічної рекристалізації при контрольованій прокатці.

З метою більш глибокого вивчення зв'язку структури з механічними властивостями, були введені крім стандартних кількісних характеристик (середній розмір зерна, доля структурних складових), наступні умовні характеристики: коефіцієнт неоднорідності зерна фериту по перерізу листа, який визначається із співвідношення:

$$K_{\text{вз}} = \frac{d_{\text{вд}}^{\text{п}}}{d_{\text{вд}}^{\text{кр}}}$$

де:  $d_{\text{вд}}^{\text{п}}$  - середній умовний розмір зерна ферита центрі листа вздовж напрямку прокатки;

$d_{\text{вд}}^{\text{кр}}$  - середній умовний розмір зерна фериту біля поверхні листа вздовж напрямку прокатки.

Коефіцієнт форми зерна, який визначається із співвідношення:

$$K_{\text{ФФ}} = \frac{\sigma_{\text{Ф}}^{\text{H}}}{\sigma_{\text{Ф}}^{\text{П}}}$$

де:  $\sigma_{\text{Ф}}^{\text{H}}$  - середній умовний розмір зерна фериту в центрі листа вздовж напрямку прокатки.

Коефіцієнт неоднорідності структури, який визначається із співвідношення:

$$K_{\text{ВФ}} = \frac{\%_{\text{Ф}}^{\text{Ц}}}{\%_{\text{Ф}}^{\text{К}}}$$

де:  $\%_{\text{Ф}}^{\text{Ц}}$ ,  $\%_{\text{Ф}}^{\text{К}}$  - доля стигтурно-вільного фериту в центрі та біля поверхні.

Дослідження характеру залежності механічних властивостей від кількісних характеристик однорідності мікроструктури для сталей типу 09Г2БТ та 09Г2ББ показали, що він різний для цілого ряду характеристик. При розгляді для однієї марки сталі відмічається різний їх характер для пластичних властивостей при статичному чи динамічному навантаженні. Результати аналізу дозволили зробити висновок, що комплекс властивостей сталі формується в результаті спільного внеску декількох механізмів зміцнення, серед яких для сталей типу 09Г2БТ значну роль відіграє зернограничне зміцнення, а для сталей типу 09Г2ББ - субструктурне.

Для підтвердження цього висновку проводились виміри мікротвердості, як інтегральної характеристики субструктури. Всі показали, що мікротвердість фериту сталі 09Г2БТ змінюється в більш широких межах, ніж для сталі 09Г2ББ. Для сталей типу 09Г2БТ з низькими пластичними властивостями

характерні більш високі значення мікротвердості, які характеризуються більш високим стандартним відхиленням і коефіцієнтом варіації. По результатам вимірів мікротвердості проведено аналіз взаємозв'язку  $H_{11}$  і механічних властивостей сталі. Характер залежностей для сталей з різними системами легування (V-Nb, Nb-Ti) виявився різним для різних механічних характеристик. При цьому для всіх сталей характерна зворотня залежність між величинами  $\sigma_B$  та  $\delta$  (з ростом однієї характеристики друга зменшується). Для сталей 09Г2БТ також характерна зворотня залежність між значеннями  $KCV^{-15}$ ,  $KCU^{-60}$  з одного боку та  $\delta$  з другого. Таким чином, аналіз залежностей механічних властивостей від мікротвердості підтвердив висновок про різний характер формування комплексу властивостей в сталях з різними системами легування.

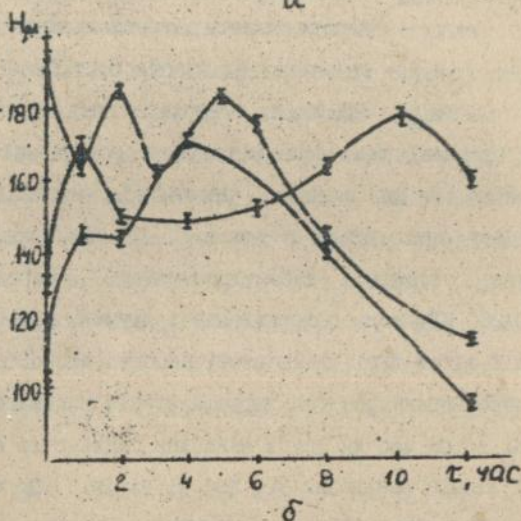
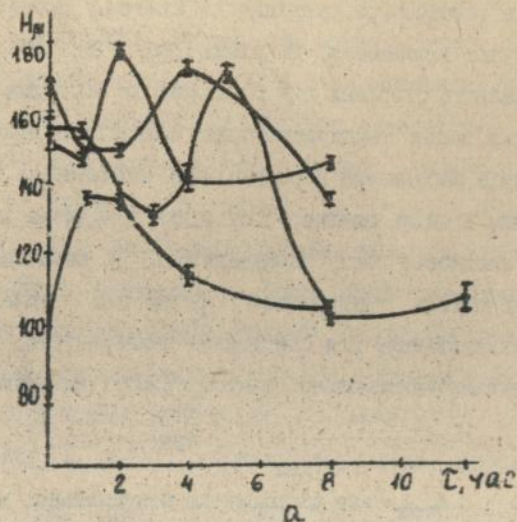
Для одержання додаткової інформації були виконані дослідження тонкої структури сталей з використанням рентгеноструктурного аналізу з наступним Фур'є-перетворенням профіля рентгенівської лінії. Показано, що сталь 09Г2ФБ має більші значення мікродеформації кристалічної решітки і менший розмір областей когерентного розсіювання, ніж сталь 09Г2БТ. Аналіз залежностей механічних властивостей від значень напрути II роду, розміру блоків та густини дислокацій показав, що для сталі 09Г2ФБ внесок субструктурного зміцнення повинен бути значно вагомішим. В той же час, спостерігається аномальний ріст значень  $KCV^{-15}$  і  $KCU^{-60}$  для сталей 09Г2ФБ,  $KCV^{-15}$  для сталей 09Г2БТ при високих значеннях мікродеформації не може бути пояснений тільки з позицій субструктурного та зернограничного зміцнень. Значний

вклад повинні вносити і механізми, які впливають на рухомість дислокацій і ступень закріплення нерухомих дислокацій.

3. Загальною характеристикою рухомості дислокацій і процесів виділення дисперсних фаз може слугувати зміна властивостей сталі в процесі штучного старіння. З мал.2 видно, що має місце наявність двох максимумів мікротвердості для зразків з високими значеннями  $\delta$ , KCV<sup>-15</sup>, KCU<sup>-60</sup>, тоді як у зразків з незадовільними властивостями другий максимум чітко не фіксується. Характер зміни мікротвердості в процесі штучного старіння дозволяє вести мову про двостадійний процес старіння з різною швидкістю проходження процесів формування атмосфер на дислокаціях, виділення дисперсних часток.

Таким чином, зразки з високими пластичними властивостями виявились практично непостарівшими. Дослідження показали, що рівень пластичних характеристик сталей визначається різним ступенем проходження процесів виділення часток і формування атмосфер на дислокаціях. Аномальну залежність ударної в'язкості від рівня мікродеформацій решітки можна пояснити тим, що мікродеформація залежить від концентрації атомів впровадження в твердому розчині. Через це в тих зразках, де старіння не пройшло, атоми впровадження (C,N) викликають деформації кристалічної решітки. По мірі їх переходу в атмосфери дислокацій і дисперсні частки, рівень мікродеформацій знижується, але знижується і кількість рухомих дислокацій, що й приводить до зниження пластичних характеристик.

Для одержання додаткової інформації про природу процесів, які проходять під час штучного старіння, вивчали



Мал. 2 Зміна мікротвердості фериту в процесі штучного старіння при  $200^{\circ}\text{C}$  на протязі 12 годин

а- плавки з рівнем механічних властивостей

нижче обумовлених технічними умовами;

б- плавки з рівнем механічних властивостей вище обумовлених технічними умовами.

вплив температури старіння на кінетику процесу. Температура старіння приймалась на рівні 180, 190, 200, 210, 220 °С, тривалість старіння від 10 хвилин до 20 годин. Вузкий інтервал зміни температури дає можливість вважати, що число центрів зародження передвиділень залишається приблизно постійним і зміна швидкості старіння пов'язана із зміною лінійної швидкості росту передвиділень. Ця величина, в свою чергу визначається дифузійною рухомістю атомів, формуючих передвиділення. Для описування температурної залежності часу досягання максимальної мікротвердості використали вираз:

$$\tau_{\max} = \tau_0 \cdot e^{-\frac{Q_{\text{еф}}}{RT}},$$

де  $\tau_{\max}$  - час старіння до максимальної мікротвердості;

$\tau_0$  - передекспоненціальний множник;

$R, T$  - універсальна газова постійна і температура;

$Q_{\text{еф}}$  - ефективна енергія активації дифузії.

Одержані дані використовувались для орієнтовної оцінки величин. Із них виходить, що енергія активації першої стадії процесу знаходиться в межах 75-85 КДж/моль, в той час як друга стадія характеризується енергією активації 200-250 КДж/моль. Зіставлення з даними, приведеними в довідковій літературі, дозволяють зробити висновок, що перша величина характерна для дифузії атомів вирвадження, таких як С і N, в той час як друга величина близька до енергії активації атомів заміщення (V, Nb, Ti та ін.). Це свідчить про те, що перша стадія процесу старіння зв'язана з дифузійною рухомістю атомів С та N, утворюючих на дислокаціях атмосфери і сегрегацій. Утворення сегрегацій створює передумови для створення передвиділень карбідів та нітридів V, Ti, Nb на дислокаціях.

Однаке кінетика цього процесу контролюється дифузійно відносно малорухомих атомів заміщення. Через це енергія активації другої стадії старіння має значення, близькі до енергії активації дифузії відповідних елементів.

4. Про зміну концентрації домішних атомів в твердому розчині і навколо дислокацій, а також про ступінь закріплення ними дислокацій робили висновок, виходячи із зміни параметрів внутрішнього тертя: фону внутрішнього тертя  $Q_{\phi}$  в амплітуднонезалежній області; величини внутрішнього тертя в амплітуднозалежній області  $Q_{\epsilon}$ ; тангенсу кута нахилу амплітудної залежності внутрішнього тертя до осі деформації  $\operatorname{tg} \alpha$ ; першої і другої критичної амплітуди деформації  $\epsilon_{\text{кр}}^{\text{I}}$  і  $\epsilon_{\text{кр}}^{\text{II}}$ .

В досліджуваних матеріалах спостерігались 2 перших критичних амплітуди деформації в області пружної деформації матеріалу, про що свідчить практично однаковий характер залежності внутрішнього тертя при наборі та скиду амплітуди деформації. Наявність двох перших критичних амплітуд дозволяє вести мову про два типи стопорів, закріплюючих дислокації, які відрізняються ступенем взаємодії з дислокаціями. Це узгоджується з висновком про наявність двостадійного процесу штучного старіння з різною швидкістю перебігу процесів формування атмосфери на дислокаціях та виділення дисперсних часток.

Виміри AZBT сталі 09Г2ФБ однієї плавки, але з різними значеннями механічних характеристик, показали, що в випадку більш пластичного матеріалу дислокації менше закріплені крапковими дефектами, а джерела Франка-Ріда починають працювати при менших напругах, прикладених до матеріалу.

Для дослідження стабільності стану дислокаційної структури проводились виміри АЗВТ при східчастому нагріванні до 50, 100, 150, 200 °С. Вони показали, що зразки з згичненими пластичними властивостями характеризуються більшими деформаціями, необхідними для початку мікроеластичної деформації. Аналіз вимірів  $\epsilon_{кр}$ ,  $\epsilon_{кр}'$ ,  $tg \alpha$  дав можливість вивчити кінетику старіння.

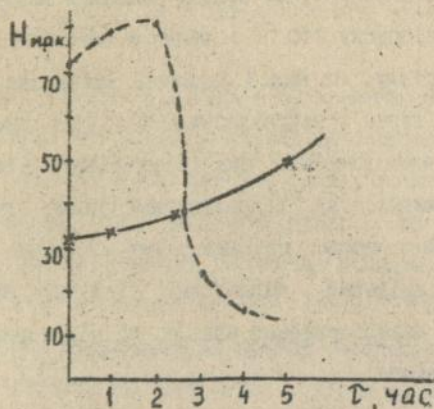
Таким чином, в сталях з високими значеннями ударної в'язкості і відносного видовження, виділення основної кількості карбонитридів закінчується раніше, ніж процес зародження нових дислокацій при пластичній деформації. Тому дислокації, які утворились, не заблоковані частками. В сталях з пластичними і в'язкісними характеристиками, нижче обумовлених  $T_U$  частки продовжують виділятися в процесі генерації дислокацій під час гарячої пластичної деформації. Через це дислокації не мають рухомості. При дальшому охолодженні ми стикаємось з процесом завершення виділення часток на дислокаціях і наступним перестарінням. В сталях з високими механічними властивостями значна частина домішних атомів залишається в твердому розчині і при охолодженні створює атмосфери. Конденсація атмосфер проходить при температурах близьких до кімнатної. Ці атмосфери являються вигідним джерелом для створення дисперсних часток при штучному старінні.

5. Для підтвердження зробленого висновку проводились виміри АЗВТ на частотах  $10^5$  та  $10^7$  Гц при відносній деформації матеріалу в пружній області  $\epsilon = 2 \cdot 10^{-6}$ . Виявлені 2 аномалії в районі 300-340 К та 390-430 К. Показано, що пік внутрішнього тертя при 300-340 К має прикмети релаксаційної природи. Наявні дані дозволяють вважати, що піки

внутрішнього тертя в цьому районі зв'язані з дефектами кристалічної посудови, внесеними пластичною деформацією. Пік в області 390-430 К має ознаки притаманні пікам при фазових переходах. Установлено, що напрям зміщення піку по осі температур при відпуску 200 °С корелює з пластичністю досліджуваного матеріалу. На мал.3 показана зміна висоти максимуму внутрішнього тертя з відрахуванням фону для сталей з різними пластичними властивостями при їх старінні. Різке зменшення висоти максимуму, за відрахуванням фону, для сталей з низькими пластичними властивостями показує, що процес старіння, виділення дисперсних часток завершився і відбувається перестарювання зразка. Це підтверджує проведені раніше дослідження.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Вивчення взаємозв'язку кількісних характеристик мікроструктури, параметрів тонкої структури з механічними властивостями показали, що комплекс властивостей маловуглецевих низьколегованих сталей формується в результаті одночасної реалізації декількох механізмів зміщення, серед яких основну роль виконують зернограничне та субструктурне зміщення. Вище показано, що істотний внесок в рівень механічних властивостей досліджуваних сталей вносять процеси динамічного перерозподілу домішних атомів в системі:  $\alpha$ -твердий розчин-дисперсні частки-дислокації в низькотемпературній області після закінчення гарячої пластичної деформації. Це веде до зниження значень відносного видовження, ударної в'язкості маловуглецевих низьколегованих сталей при стабільній технології виробництва.



Мал.3 Зміна висоти максимуму внутрішнього  
тертя в залежності від часу старіння  
(частота виміру 10 МГц, температура, при  
якій спостерігались максимуми 390–420 К)

- для зразків з рівнем механічних  
властивостей нижче обумовлених ТУ;  
— для зразків з рівнем механічних  
властивостей вище обумовлених ТУ.

2. Показано, що стан дислокаційної структури мартенситних низьколегованих сталей після гарячої пластичної деформації є нестабільним і в області температур 20-250 °С в сталях проходять процеси старіння. Вони супроводжуються зміною енергії зв'язку дислокацій з частками та зміною довжини рухомих сегментів дислокацій. Установлено, що в сталях цього типу реалізується двостадійний процес старіння. Перша стадія процесу старіння пов'язана з дифузійним атомів азоту та вуглецю, утворюючих на дислокаціях атмосфери і сегрегації. Це створює передумови для початку другої стадії процесу старіння: створення передвиділень карбідів та нітридів Ti, V, Nb на дислокаціях, оформлення виділень та їх послідовного росту.

3. Методами математичної статистики встановлено, що найбільш вагомими факторами в регресійних моделях I і II порядку є вміст карбонітридоутворюючих елементів V, Nb, Ti, а також їх парні взаємодії з вуглецем та азотом. Ці ефекти характеризуються високими значеннями часткових коефіцієнтів кореляції. Доля пояснених варіацій у рівняннях для пластичних характеристик  $\delta$ ,  $KCV^{15}$ ,  $KCU^{60}$  знаходиться в межах 70-80%. В рівняннях для міцнісних характеристик  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0.2}$ , доля поясненої варіації складає 85-96%.

4. Кількісні металграфічні дослідження показали, що недовольним дефектом структури являється укрупнення зерна фериту біля поверхні листа в порівнянні з центральною частиною. Особливістю частотних кривих розподілу зерен фериту по розмірам є реалізація бімодального закону розподілення. Показано, що з пластичними властивостями найбільш тісно зв'язаний коефіцієнт асиметрії.

5. На основі систематичного вивчення спектрів внутрішнього тертя в амплітуднонезалежній та амплітудозалежній областях в діапазонах частот 1 Гц,  $10^5$  Гц,  $10^7$  Гц встановлено, що параметри внутрішнього тертя характеризують ступінь завершеності процесів старіння низьковуглецевих сталей після гарячої пластичної деформації.

Основний зміст дисертаційної праці викладено в наступних публікаціях:

1. Дацко О.И., Пашинская Е.Г., Пашинский В.В. Исследование взаимосвязи неупругих свойств и механических характеристик низколегированных сталей для магистральных трубопроводов // Изв. ВУЗов. серия Чёрная металлургия. - 1992. - №2. - с.94.

2. Дацко О.И., Полудняк В.Е., Пашинская Е.Г. и др. Исследование причин нестабильности механических свойств низколегированных сталей, получаемых путём контролируемой прокатки // В сб.: Пластическая деформация металла в условиях внешних энергетических воздействий. - Новокузнецк, 1991. - с.76.

3. Пашинская Е.Г. Исследования тонкой структуры малоуглеродистых сталей типа 09Г2 // В сб.: Структура и свойства легированных сталей. - Киев, 1992. - с.11.

4. Дацко О.И. Пашинская Е.Г. Структура, свойства и дислокационная структура сталей типа 09Г2 с микролегирующими добавками // В сб.: Структура, дефекты и свойства сплавов, полученных нетрадиционным легированием (деформационным, механоактивационным, быстрой закалкой и быстрым отжигом). - Екатеринбург, 1993. - с.53.

5. Конарев В.Г., Геллер А.Л., Каттенберг С.А., Пашинская Е.Г. / Использование контролируемой прокатки для подготовки структуры сталей к сфероидизирующему отжигу // В сб.: Совершенствование технологии термической и термомеханической обработки металла. 1986. - с.113 Деп. рукопись ЗД/3346, библиографический указатель ВИНТИ.

6. Пашинский В.В., Пашинская Е.Г., Дегтяренко В.Л. и др. Взаимосвязь характеристик структуры и комплекса механических свойств сталей типа 09Г2 после контролируемой прокатки. - Рук. деп. в ин-те Черметинформация, N 5854, 28.02.1992.

7. Пашинская Е.Г., Дашко О.И., Полудняк О.Е. О причинах нестабильности механических свойств, структуры и тонкой структуры низколегированных сталей для магистральных трубопроводов // Тезисы докл. конф. молодых ученых и специалистов "Создание и освоение экологически чистых, ресурсосберегающих технологий в чёрной металлургии". - Донецк, 1991. - с. 97.

8. Дашко О.И., Пашинская Е.Г. Особенности тонкой структуры низколегированных сталей типа 09Г2, полученных методом контролируемой прокатки // Изв. ВУЗов. Серия Чёрная металлургия. Принято к опубликованию во второй половине 1994 г.

Пашинская Е.Г. Механизмы формирования комплекса свойств деформированных малолегированных сталей.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела, Донецкий физико-технический институт Национальной Академии Наук Украины, г. Донецк, 1994.

Защищаются результаты исследования механизмов формирования свойств низколегированных сталей в процессе контролируемой прокатки. Установлено, что состояние дислокационной структуры после горячей пластической деформации является нестабильным в низкотемпературной области и комплекс механических свойств стали формируется в результате динамического перераспределения примесных атомов между  $\alpha$ -твердым раствором, дислокациями и дисперсными частицами. Установлен двухстадийный характер процессов старения в сталях этого типа после регламентированной деформации.

Ключові слова:

Дислокаційна структура, старіння, дисперсні частки.

Pashinskaya E.G. The mechanisms of formation of the low-alloy steels properties complex.

The thesis for the Master's degree in Physic-Mathematic Science, speciality 01.04.70 - the Physic of Solid State, Donetsk Physical-Technical Institute of National Academy of Science, Ukraine, Donetsk, 1994.

The results of investigations of the mechanisms of formation of the low-alloy steels properties complex in the process of controlled rolling are defended in this thesis. It is established that the state of dislocation structure after the hot plastic deformation is not stable in the low-temperature interval. The complex of mechanical properties of steel is formed in the result of the dynamic redistribution of impurities atoms between the  $\alpha$ -solid solution, dislocations and the dispersed particles. It is established that the process of ageing in the steels of this type has the two-stage nature after the regulated deformation.

Ключові слова:

Дислокаційна структура, старіння, дисперсні частки.

Ответственный за выпуск М.А.Белоголовский

---

Подписано к печати 10.94

Формат 60 x 84/16. Бумага офсетная

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0. Уч. изд. 1.0

Тираж 100 экз. Заказ № 8

---

Ротапринт ИГи НАН Украины

340048, Донецк - 48, ул. Университетская, 77

AB 31.390

**AB 31.390**