УДК 669.017:669.15–194.018.26

В.З.Куцова, О.Ю.Путнокі, В.Г.Іванченко, Т.В.Котова, О.О.Величко

ЕЛЕКТРОННОМІКРОСКОПІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТІ ДЕФОРМОВАНОЇ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Національна металургійна академія України,
ВАТ «Запоріжсталь», ІЧМ НАН України

Визначено особливості формування тонкої структури зразків сталі 08пс після двопрохідної прокатки. Встановлено, що в структурі вихідної заготовки та зразка, деформованого в аустеніто–феритній та ферито–перлітній областях, спостерігаються структурні зміни, що свідчать про реалізацію процесів полігонізації та рекристалізації. Вказані структурні зміни могли привести до формування рівня властивостей, які не забезпечують металу здатність до глибокого витягання. Дослідження показали, що задовільну здатність до глибокого витягання мають зразки сталі 08пс, деформовані в аустенітній та ферито–перлітній температурних областях, охолоджені на повітрі.

низьковуглецева сталь, тонка структура, перліт, цементит, спеціальні границі зерен, механічні властивості

Стан проблеми. У зв’язку зі зростанням потреби машино– та автомобілебудування в гарячекатаному тонколистовому прокаті, збільшуються об’єми виробництва цього виду металопродукції. При малій товщині листа складно витримати високу температуру деформації, тому розробляються способи прокатки в субкритичному інтервалі температур (СКІТ) з метою запобігання несприятливих умов традиційної технології гарячої прокатки: закінчення прокатки на безперервному широкополосному стані в двофазній аустеніто–феритній області через великі теплові втрати, що приводить до утворення різнозернистої структури металу [1,2]. Для звичайних низьковуглецевих сталей, деформованих при субкритичних температурах, дані про вплив процесів рекристалізації, полігонізації, природи границь зерен на властивості металу практично відсутні.

Поглиблене вивчення будови границь зерен низьковуглецевих ферито–перлітних сталей важливо для керування процесами структуроутворення та отримання металопродукції з оптимальним поєднанням механічних та експлуатаційних властивостей. Практичне використання особливих властивостей спеціальних границь полягає в регулюванні параметрів технології з метою отримання підвищеної кількості спеціальних границь в кінцевій структурі металу [3].

Дослідження та оцінка деталей тонкої будови металів та сплавів неможливі без використання дифракційної електронної мікроскопії, що дозволяє прямим методом отримати інформацію про структуру металу, яку через низьку, дозволяючи, здатність не може виявити оптична мікроскопія [4]. Тому актуальною задачею є виявлення особливостей формування

тонкої структури тонколистової низьковуглецевої сталі, деформованої при субкритичих температурах, що дозволить керувати процесами структуроутворення для отримання металопрокату з високим комплексом механічних властивостей.

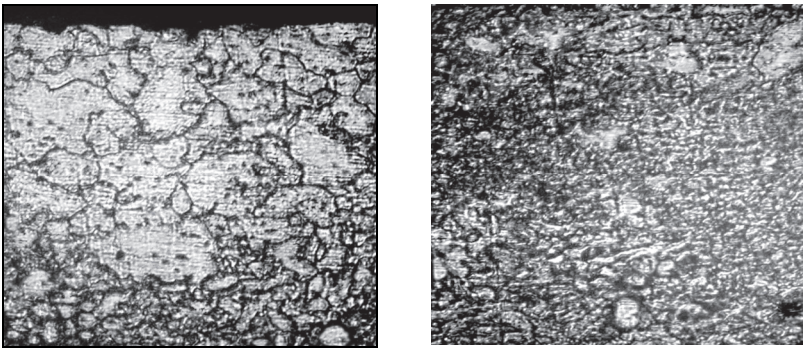
Методика дослідження. Матеріалом для досліджень служили картки низьковуглецевої сталі 08пс товщиною 2,07 мм поточного виробництва ВАТ «Запоріжсталь» наступного хімічного складу, мас. %: 0,08 C; 0,3 Mn; 0,01 Si; 0,03 S; 0,023 P; 0,04 Cr; 0,03 Ni; 0,03 Cu; 0,02 Al. Нагрів металу перед прокаткою здійснювали зі швидкістю 3^0C/c в електричній печі СНОЛ 25414/11–И1. Деформаційну обробку проводили на лабораторному одноклітьовому стані дуо 280 за два проходи (перший – в аустеніто–феритній, другий – в ферито–перлітній області температур). Швидкість прокатки складала 1,4 м/с, тривалість паузи між проходами 13–15 сек. Зразки після деформації охолоджували на повітрі (середня швидкість охолодження $V_{ОХОЛ} \sim 5–8^0$C/c).

Мікроструктуру зразків сталі 08пс вивчали з допомогою металографічного мікроскопу "Neophot–21". Для виявлення загальної мікроструктури зразки піддавали травленню в 5% розчині азотної кислоти з наступною промивкою в струмі проточної води. Розмір зерна фериту визначали за методикою випадкових січних за ГОСТ 5639–82, а також за допомогою комп'ютерного забезпечення – програми Adobe Photoshop CS2. Товщину поверхневого крупнозернистого шару розраховували за методикою визначення лінійних розмірів за допомогою окуляр–мікрометра.

Твердість зразків визначали методом Роквелла за стандартною методикою. Вимірювання механічних властивостей проводили на універсальній машині «Інстрон» відповідно до ГОСТ 1497–84 на зразках, що вирізані уздовж напрямку прокатки. Структуру при великих збільшеннях вивчали за допомогою електронного мікроскопу JSM–840 з системою мікроанализа Link– 860/500 (фірма «Link Analytical», Англія). Дослідження тонкої структури зразків низьковуглецевої сталі здійснювали на електронному мікроскопі JEM – 200Cx з прискорюючою напругою 200кв за методом тонких фольг на просвічування із використанням мікродифракції від мікроділянки, яка вибрана. Підготувку фольг для електронномікроскопічного дослідження проводили за допомогою іонного стоншення зразків на установці для вакуумного препарування [5].

Результати дослідження та їх обговорення. Мікроструктура вихідної заготовки характерізується зерном фериту величиною 20–90 мкм в поверхневій зоні, 10–60 мкм в центральній зоні листа. Зразок товщиною 1,73 мм, оброблений зі ступенем деформації 16,4 %, за режимом з нагрівом до 1000^0C і прокаткою в першому проході в області двофазної аустеніто–феритної структури металу, в другому проході – при температурі 600^0C. Мікроструктурні дослідження такого зразка показали, що в структурі готового прокату утворюється поверхневий крупнозернистий шар товщиною 300–450 мкм. В поверхневому шарі листа виявлені зерна роз-

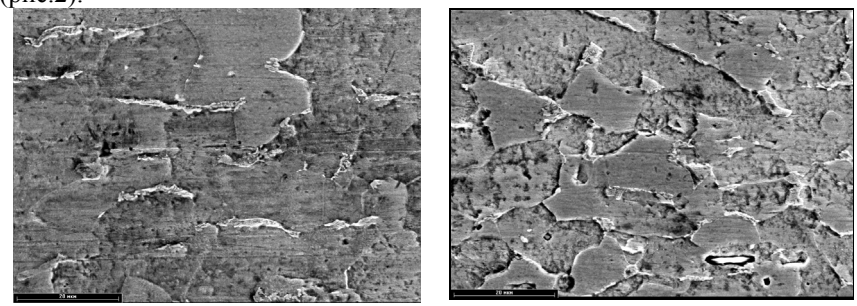
міром 15–160 мкм (рис.1,а), в центральній зоні – 10–60 мкм (рис.1,б). Змішана структура із крупними зернами фериту в поверхневих чи внутрішніх шарах листа, яка нерівномірно деформується при подальшій холодній прокатці, може викликати поперечні тріщини по боковим окрайкам листа [6].



а б

Рис.1. Мікроструктура зразка сталі 08пс, двопрохідна прокатка, Σ16,4%: а – поверхнева зона, б – центральна зона; × 200

При дослідженні за допомогою електронного мікроскопу JSM–840 вихідної заготовки та деформованого зразка сталі 08пс поперек напрямку прокатки при великому збільшенні спостерігаються прошарки перліту, а також білі ділянки в структурі – виділення цементиту по границях зерен (рис.2).



а б

Рис.2. Мікроструктура зразків сталі 08пс: а – вихідна заготовка; б – прокатка в МКІТ та СКІТ, Σε=16,4%; × 1500

Досліджували тонку структуру в поверхневих і центральних зонах деформованої заготовки та зразка, прокатаного за режимом: $T_{нагр}$= 1000^{0}С; $T_{1пр}$ = 750^{0}С (міжкритичний інтервал температур – МКІТ); $T_{2пр}$ = 600^{0}С

(субкритичний інтервал – СКІТ), сумарний ступінь деформації 16,4%, охолодження на повітрі.

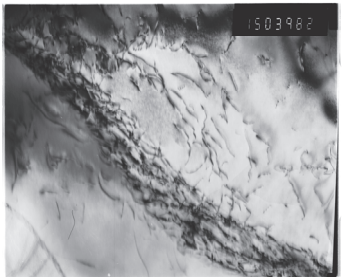
Для аналізу структурного стану та спостереження змін, що виникли в процесі деформації, проведено співставлення тонкої структури вихідної заготовки сталі 08пс та зразка, що деформований в міжкритичному та субкритичному інтервалах температур з сумарним ступенем деформації 16,4%, охолоджений на повітрі (рис.3). По всьому перерізу листа формуються полігональні субзеренні границі та дрібні карбіди на дислокаціях (рис. 3,а). Рис.3,б ілюструє наявність в поверхневій зоні деформованого зразка сталі 08пс колоній перліта, який має пластинчату будову. Поряд з колоніями пластинчатого перліту в структурі поверхневої зони вихідної заготовки спостерігаються ділянки перліту з сфероідизованим цементитом та окремі кристали слабодеформованого цементиту в центрі феритних зерен (рис.3,в). Електронномікроскопічні зображення тонкої структури, яка сформована в поверхневій зоні деформованого зразка (рис.3,г) демонструють колонії сфероідизованого перліту та окремі кристали цементиту на границі феритних зерен.

Відома суттєва роль границь зерен в поведінці металу при впливі на нього зовнішніх факторів. Двійникові границі – приклад великокутових границь з високим ступенем збігу, зустрічаються в рекристалізованих металах [7]. Підвищений вміст спеціальних низько енергетичних границь може здійснити суттєвий вплив на структуру і властивості виробів із сталей з феритною основою [3]. Для виявлення спеціальних границь в фериті дотримувались основних ідентифікаційних ознак, які вказують на знижену поверхневу енергію границі та відрізняють спеціальні низькоенергетичні границі від великокутових границь загального типу: наявність зигзагоподібних фасеток, знижена здатність до травлення, протилежні кути в потрійних стиках близькі до 180° та ін. Поєднання або виявлення одного чи двох із ознак вказує на належність цієї границі до спеціальних [8].

В центральній зоні деформованого зразка (рис.3,д) в зрівнянні з центральною зоною, в структурі присутні окремі спеціальні границі (верхня частинка знімку), спостерігається низька щільність дислокацій усередені зерна (рис.3,е), колонії перліту відсутні. Структурні зміни привели до різнозернистості структури в поверхневому шарі з більшим розкидом значень розмірів зерен фериту, ніж в заготовці.

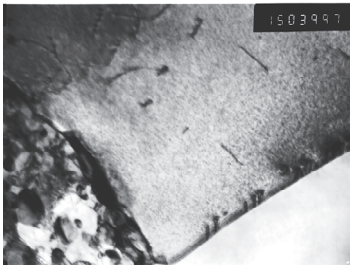
Зіставлення особливостей тонкої структури вихідної заготовки та зразка сталі 08пс, деформованого в МКІТ та СКІТ, приведені в таблиці. Слід відзначити, що і в заготовці, і в дослідженому зразку спостерігаються структурні зміни, які свідчать про реалізацію як процесів рекристалізації, так і полігонізації. Однак, в поверхневому шарі деформованого листа процеси вторинної рекристалізації розвивались більш інтенсивно, що і привело до формування більшої різнозернистості. З іншої сторони, вказані структурні зміни могли привести до формування рівня властивостей, що не забезпечують добру здатність до штампуємості ($\sigma_в$ = 450 МПа; $\sigma_т$ = 375

МПа; $\sigma_т / \sigma_в \sim 0,83$; $\delta = 23\%$; HRB 85). Дослідження, які проведені раніше, показали, що задовільну здатність до глибокого витягання мають зразки сталі 08пс, деформовані в аустенітній та ферито–перлітній температурних областях, охолоджені на повітрі [9].

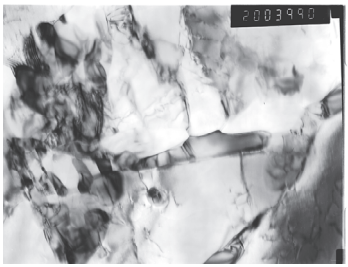


а–×15000

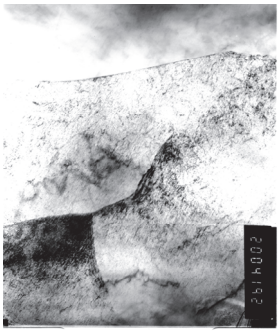
б–×15000



в–×20000



г–×15000



д–×20000

е–×10000

Рис.3. Тонка структура вихідної заготовки (а, в, д) та зразка сталі 08пс, деформованого в МКІТ і СКІТ (б, г, е): а–г – поверхнева зона; д, е – центральна зона, просвічуюча електронна мікроскопія

Таблиця. Тонка структура вихідної заготовки сталі 08пс та зразка, деформованого в МКІТ та СКІТ, Σε = 16,4%, охолодження на повітрі

Вихідна заготовка		$T_{нагр}$= 1000°C; $T_{1пр}$ = 750°C; $T_{2пр}$($T_{кп}$) = 600°C	
поверхнева зона	центральна зона	поверхнева зона	центральна зона
Полігональна субзеренна границя	Субзеренна границя	–	–
ВКГ	ВКГ (у т.ч. спеціальні границі)	ВКГ	ВКГ (у т.ч. спеціальні границі)
Пластинчатий перліт	–	–	–
Сферидизований цементит в центрі зерна і в колонії перліта	–	Колонії сфероідизованого перліту і кристали цементиту на границях зерен	–
Карбіди Fe_3C на дислокаціях	Карбіди Fe_3C на дислокаціях	Карбіди Fe_3C на дислокаціях	Карбіди Fe_3C на стиках дислокацій і зерен
Цементитні частки на полігональній границі	–	–	–
Слабодеформований цементит в центрі зерна	–	–	Окремі цементитні частки
–	Субзерна з дислокаціями та карбідами	Субзерна витягнутої форми	Субзеренна структура
–	–	Одиночні дислокації в фериті і підвищена щільність дислокацій	–
–	–	Полігональні стінки з підвищеною щільністю дислокацій	–
–	–	–	Зеренна структура з низькою щільністю дислокацій в середині зерна

Висновки. Досліджено тонку структуру сталі 08пс за допомогою електронної мікроскопії. Показано, що в структурі центральної зони листа із сталі 08пс, деформованого в субкритичному інтервалі температур з охолодженням на повітрі, у порівнянні з поверхневою зоною, присутні окремі спеціальні границі, спостерігається низька щільність дислокацій, колонії перліту відсутні. Однак, вказані структурні зміни привели до формування рівня властивостей, що не забезпечують добру здатність металу до глибокого витягання. Отримані результати дозволили розширити теоретичні уявлення про закономі-

рності формування структури деформованої сталі 08пс і дають можливість їх практичного використання.

1. *Исследование* влияния ферритной прокатки на микроструктуру и механические свойства особотонкой листовой низкоуглеродистой стали / В.Г.Иванченко, С.Д.Адамский, В.Т.Тилик [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2000. – Вып. 7. – С.67–69.
2. *Новиков И.И.* Металловедение: учебник в 2 т. / Под общей редакцией В.С. Золоторевского – М.: Издательский Дом МиСиС, 2009.
3. Т.1. – 2009. – 496с.
4. *В.И. Большаков* Атлас структур металлов и сплавов / В.И. Большаков, Г.Д. Сухомлин, Д.В. Лаухин // – Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2010. – 174 с.
5. *Геллер Ю.А.* Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю.АГеллер, А.Г.Рахштадт. – М.: Металлургия, 1984. – 384с.
6. 5.*Методика* утонения образцов разнородных сварных соединений для электронномикроскопических исследований / Г.Ф.Даровский, Н.П.Абрамов, Л.И.Маркашова, Т.Г.Таранова // Автоматическая сварка. – 1985. – №12. – С.60.
7. *Дедек Вл.* Полосовая сталь для глубокой вытяжки / В.Дедек // – М.: Металлургия, 1970. – 208с.
8. *Грабский М.В.* Структура границ зерен в металлах / М.В.Грабский // – М.: Металлургия, 1972. – 160с.
9. *Специальные* границы и множественные стыки в доэвтектоидном феррите низкоуглеродистых сталей / В.ИБольшаков, Г.Д.Сухомлин, Д.В.Лаухин [и др.] // Зб. Наукових праць «Теоретичні основи будівництва» Придніпровської державної академії будівництва та Варшавського технічного університету. Варшава. – 2007. – С.72–79.
10. *Куцова В.З.* Властивості, структура і розподіл елементів по перерізу низьковуглецевого тонколистового прокату / В.З.Куцова, Т.В.Котова, В.Г.Иванченко // МТОМ.– 2011. – № 1–2. – С. 200–208.

Статья рекомендована к печати докт. техн. наук И.Ю.Приходько

***В.З.Куцова, А.Ю.Путноки, В.Г. Иванченко, Т.В. Котова,* О.А.Величко**

Електронномикроскопические исследования структуры и свойства деформированной низкоуглеродистой стали

Определены особенности формирования тонкой структуры образцов стали 08пс после двухпроходной прокатки. Установлено, что в структуре исходной заготовки и образца, деформированного в аустенито–ферритной и феррито–перлитной областях, наблюдаются структурные изменения, свидетельствующие о реализации процессов полигонизации и рекристаллизации. Указанные структурные изменения могут привести к формированию уровня свойств, которые не обеспечивают способность к глубокой вытяжке. Исследования показали, что удовлетворительная способность к штампуемости стали 08пс выявлена после деформации в два прохода в аустенитной области, субкритическом интервале температур и охлаждении на воздухе.