

УДК 621.771.23.09

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.78

ВПЛИВ ПРОЦЕСУ ПРОКАТУВАННЯ ЗА СУБКРИТИЧНИХ ТЕМПЕРАТУР НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

Котова Т. В., Носко О. А., Аюпова Т. А., Волинчук В. О.
Український державний університет науки і технологій

Анотація. Досліджено структуру та механічні властивості тонколистового прокату із низьковуглецевої сталі, що використовується в автомобільній промисловості. Результати роботи можуть бути застосовані для визначення раціональних режимів оброблення, що передбачають прокатку за субкритичних температур, для підвищення комплексу властивостей металу й для отримання якісних деталей холодним штампуванням.

Ключові слова: низьковуглецева сталь, гаряче прокатування, мікроструктура, механічні властивості.

Вступ

Автомобілебудування є одним із найбільших споживачів продукції металургійних підприємств, які виробляють тонкий холоднокатаний лист із низьковуглецевих сталей. Визначальним елементом для збільшення інтегрального показника якості автомобілів є використання раціональних матеріалів для виробництва кузовних деталей, які б задовольняли вимогам стандартів до експлуатаційної надійності та безпеки в разі одночасної мінімізації сумарних витрат на їх виготовлення.

До автолистової сталі висуваються високі вимоги щодо міцності, яка дозволить знизити масу кузовних деталей автомобіля, а також необхідного рівня пластичності для підвищення технологічності виробництва.

Низьковуглецева сталь 08пс використовується в автомобільній галузі для виготовлення деталей із тонколистового прокату методом холодного штампування. Основним її недоліком є знижені показники міцності, які можуть не задовольняти нормам безпеки, тому завдання підвищення механічних властивостей автолистової сталі за мінімізації витрат є актуальним.

Аналіз публікацій

Властивості матеріалу, зокрема сталі, визначаються багатьма факторами, головним з яких є структурний. Керувати структурою гарячекатаної сталі можна зміною температурних умов завершення прокатки та режимів охолодження металу.

Структурні та субструктурні зміни в сталі – складний комплекс процесів. Під час деформації в аустеніті розвиваються ковзання всередині зерна та двійникування в хвилеподібному типі границь зерен.

Актуальним є питання визначення кількісного співвідношення звичайних і спеціальних границь у феритній складовій конструкційних сталей, що дозволяє впливати на зернограничну структуру та покращити експлуатаційні характеристики металів і сплавів з ОЦК-решіткою [1].

В області гарячої деформації структурні зміни відбуваються через формування субзернової структури. В інтервалі після обтискування сталь частково відновлює свою структуру. Тому структура гарячедеформованої сталі є результатом декількох обтискувань за різних температур і пауз між ними, тобто відбувається накладення статичних та динамічних процесів структурних змін [2].

Під час прокатування та охолодження відбуваються процеси фазової перекристалізації матриці, зміни величини та форми зерен фериту, орієнтування та ступеня досконалості кристалітів. Тип розвитку та ступінь завершення цих процесів залежать від температур, за яких відбувається процес прокатування, від ступеня обтискування, швидкості деформації та охолодження металу.

Запобігти несприятливим температурним умовам для традиційної технології гарячого прокатування можна за допомогою оброблення металу в області однофазної феритної структури, що знаходиться нижче критичної точки A_{c1} . Прокатування тонкого листа в субкритичному інтервалі температур забезпечить отримання рівномірної структури металу, що визначає рівень його механічних властивостей, а також якість штампованих деталей [2, 3].

Умови завершення деформації визначають кінцеву структуру сталі. Структурними

складовими гарячекатаної низьковуглецевої сталі 08пс є м'який пластичний ферит і твердий крихкий цементит. Рівень механічних властивостей і здатність гарячекатаного металу до витягання залежить здебільшого від величини та форми феритних зерен, а також від кількості, форми та розподілу цементиту. ДСТУ 2834-94 регламентує величину зерна фериту, яка для гарячекатаного прокатування має бути не більше ніж 62 мкм, а нерівномірність зерна фериту може бути в межах трьох суміжних номерів зернистості. Велика різнозернистість призводить до нерівномірної деформації металу під час витягування, що може бути причиною утворення розривів.

Рівномірна структура необхідна також в гарячекатаному металі, який використовується як підкату для станів холодного прокатування. Сприятлива структура прокатування є головною передумовою досягнення високої здатності сталей до глибокого витягування після остаточного термічного оброблення, оскільки структура гарячекатаного металу суттєво впливає на тип структури після холодного прочування й подальшого рекристалізаційного відпалу. Ступінь деформації металу на цих станах може досягати 70–80 %, тому велика різнозернистість, що погіршує технологічну деформованість за температур холодного прокатування, може стати причиною утворення тріщин в листі, а отже, і виробничих аварій. Водночас різнозернистість не усувається ні холодним прокатуванням, ні рекристалізаційним відпалом [3, 4].

Мета та постановка завдання

Аналіз літературних джерел доводить, що проблема формування різнозернистої структури вирішується способом регулювання температурно-деформаційних параметрів виробництва тонколистового прокатування, що дозволяє забезпечити оптимальні характеристики кінцевої структури та необхідний рівень механічних властивостей металу відповідно до ДСТУ 2834-94. Таким чином, дослідження впливу режимів прокатування за субкритичних температур на формування структури та властивості низьковуглецевої сталі є актуальним завданням.

Виклад основного матеріалу

Методика та результати досліджень

Нагрівання металу здійснювали в електричній печі СН 1,62,51/11-И2 зі швидкістю 3 °С/с, час витримки становив 2–4 с. Процес прокатування здійснювали на лабораторному

одноклітьовому обладнанні ДУО 280 в два етапи в аустенітному та ферито-перлітному інтервалах температур (швидкість прокатування становила 1,4 м/с, тривалість паузи між етапами – 13–15 с). Післядеформаційний режим оброблення – охолодження зразків на повітрі ($V_{\text{охол}} \sim 5\text{--}8^\circ\text{C}/\text{с}$).

Дослідження мікроструктури зразків сталі 08пс здійснювали за допомогою металографічного та електронного мікроскопа JSM-840 з системою мікроаналізу «Link-860 /500», тонку структуру вздовж перерізу зразків сталі 08пс досліджували за допомогою електронного мікроскопа JEM – 200Сх. Комплекс механічних властивостей металу визначали, використовуючи стандартні методи випробувань на розтягнення.

Аналіз результатів досліджень особливостей формування та кількісних параметрів структури демонструє, що мікроструктура вихідної заготовки сталі 08пс (рис. 1, а) визначається зерном фериту, величиною 20–90 мкм у поверхневій та 10–60 мкм у центральній зоні листа.

Після прокатування в два етапи в аустенітній та ферито-перлітній областях температур у структурі листа утворюється поверхневий шар, розмір зерна в якому становить 15–160 мкм. У структурі центральної зони деформованого листа величина зерна становить 10–60 мкм. Під час дослідження в разі великого збільшення в структурі деформованого зразка сталі 08пс спостерігаються прошарки перліту та виділення цементиту вздовж границь зерен (рис. 1, б). Змішана структура з великими за розмірами зернами фериту на поверхні чи в центральних зонах листа, які нерівномірно деформуються під час наступного холодного прокатування, призводить до утворення поперечних тріщин вздовж крайків листа. Границі зерен впливають майже на всі процеси, які відбуваються під час деформації, зокрема в рекристалізації, від них залежить надійність та якість матеріалу. За певних параметрів розорієнтування частина вузлів сусідніх зерен є однаковою. Границя вздовж площини, яка містить вузли, що співпадають, є спеціальною, оскільки має впорядковану структуру зі своїм періодом та особливими властивостями. Підвищення вмісту спеціальних границь в структурі під час температурно-деформаційних оброблень металопрокату із ферито-перлітних сталей покращує комплекс його фізико-механічних властивостей. Використання зернограничного конструювання під час розроблення техноло-

гічних процесів дає можливість керувати властивостями металопродукції [5].

Електронно-мікроскопічні дослідження тонких фольг зі зразків сталі 08пс дозволили

проаналізувати структурні зміни в процесі випробуваного режиму деформації (рис. 2).

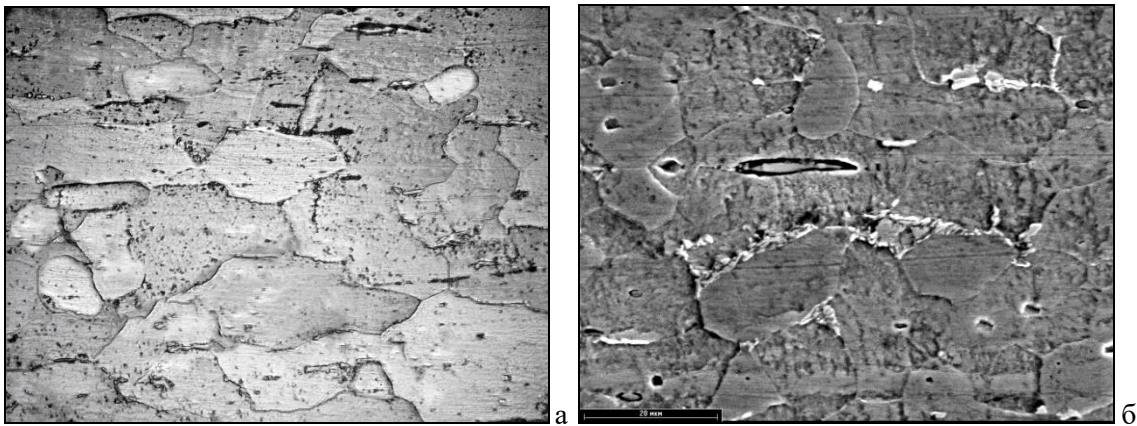


Рис. 1. Мікроструктура сталі 08пс: а – вихідна заготовка, $\times 200$; б – $\epsilon = 16,4\%$, $\times 1500$

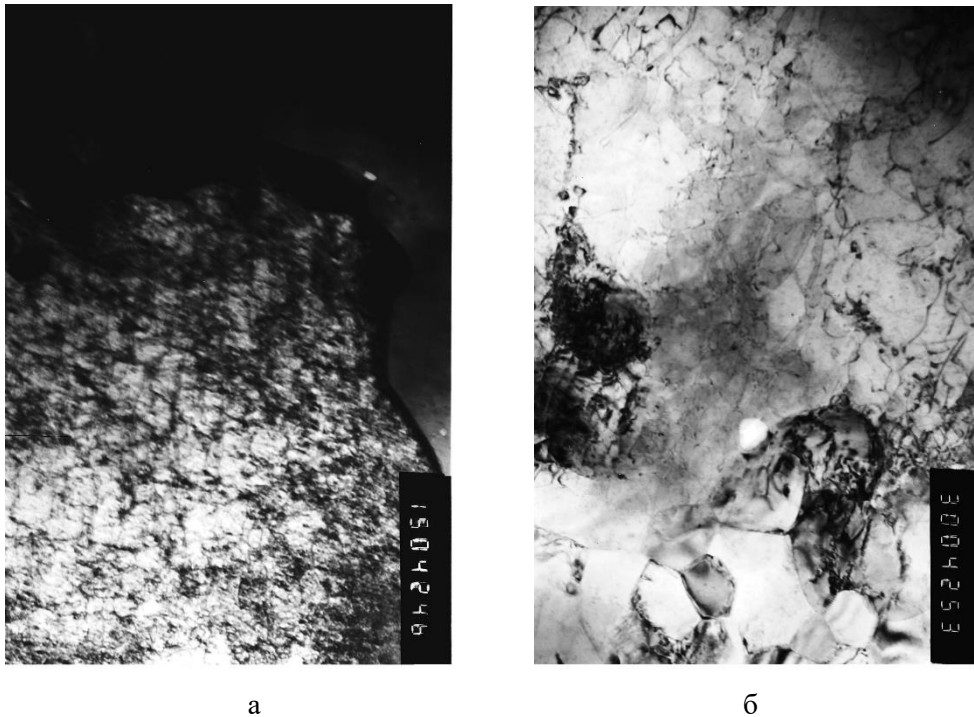


Рис. 2. Тонка структура центральної зони деформованого зразка сталі 08пс: а – $\times 15000$; б – $\times 20000$

Досліджували тонку структуру в поверхневих і в центральних зонах заготовки та зразка, прокатаного за режимом: $T_{\text{нагр}} = 1000^{\circ}\text{C}$; $T_{1\text{пр}} = 750^{\circ}\text{C}$ (аустеніто-феритна область), $T_{2\text{пр}} = 600^{\circ}\text{C}$ (ферито-перлітна область), ступінь деформації – 16,4 %, охолодження на повітрі. Деформація заготовки в аустеніто-феритній та ферито-перлітній областях з охолодженням на повітрі призводить до структурних змін в поверхневому шарі листа: у структурі поверхневої зони відсутні колонії пластинчастого перліту та ве-

ликі за розміром кристали цементиту в середині феритних зерен. Поруч з колоніями сфероїдизованого перліту та окремими кристалами цементиту на границі феритних зерен знаходяться окремі області продуктів перлітного перетворення аустеніту з меншою міжпластинчастою відстанню, ніж в перліті.

Основний механізм рекристалізації (міграція границь зерен) може уповільнюватись чи взагалі зупинятись цементитними пластинами чи дрібними карбідами округлої форми. На рис. 2 подано фрагменти тонкої структури

центральної зони деформованого зразка сталі 08пс. Аналіз даних рис. 2 демонструє, що на границях зерен фериту та в об'ємі зерна спостерігаються дисперсні виділення (карбіди, нітриди та карбонітриди), на яких кріпляться дислокації та блокують процеси збиральної та вторинної рекристалізації.

Структурні зміни в деформованому зразку сталі 08пс призвели до формування різнозернистої структури в поверхневому шарі з більшим розкидом значень розмірів феритних зерен, ніж в заготованці. Ці зміни свідчать про реалізацію процесів рекристалізації та полігонізації, але процеси вторинної рекристалізації на поверхні листа були більш інтенсивними, що призвело до формування різнозернистої структури та рівня властивостей, який не відповідає вимогам ДСТУ 2834-94: $\sigma_b = 450$ МПа; $\sigma_T = 375$ МПа; $\delta = 23$ %; HRB 85.

Висновки

Досліджено структуру та властивості сталі 08пс після прокатування за субкритичних температур. Здійснено порівняльний аналіз тонкої структури вихідної заготовки та деформованих зразків низьковуглецевої сталі. Визначено, що в структурі деформованих зразків і вихідної заготовки наявні зміни, які свідчать про реалізацію процесів полігонізації та рекристалізації і не забезпечують рівня механічних властивостей металу відповідно до ДСТУ 2834-94. Результати досліджень допоможуть визначити раціональні режими оброблення тонколистового прокатування зі сталі 08пс для формування однорідної структури металу та підвищення комплексу його механічних властивостей.

Література

1. Сухомлин Г. Д., Щудро Р. Е., Щудро А. Е. Удосконалення методики визначення спектрального складу границь зерен у низьковуглецевих сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 2. С. 30–35.
2. Forecasting and controlling the structure and properties of ultralow-carbon steels / Yu. M. Koval, V. Z. Kutsova, Kotova, M. A. Kovzel. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2021. Vol. 43. P. 753–768. ISSN1024-1809 (Print) E-ISSN: 2617-1511 (Online).
3. Тонколистова сталь: монографія / Ю. С. Проїдак та ін. Дніпро: НМетАУ, 2018. 311 с.
4. Левченко Г. В., Самохвал В. М. Технологія якості і сертифікація. Дніпродзержинськ: ДТТУ, 2009. 117 с.
5. The influence of deformation scheme on grain boundaries structure of carbon steel boiler tubes. Hutnik / L. V. Opryszko, G. D. Suchomlin, Z. Stradomsky, L. N. Deyneko. *Wiadomości Hutnicze*. 2014. Vol. 81. № 5. S. 308–313.

References

1. Sukhomlin H. D., Shchudro R. E., Shchudro A. E. Udoskonalennja metodiki viznachennja spektral'nogo skladu granic' zeren u niz'kovuglecevih staljah [Improvement of the method of determining the spectral composition of grain boundaries in low-carbon steels]. *Metalloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*. 2015. No. 2. Pp. 30–35 [in Ukrainian].
2. Koval Yu. M., Kutsova V. Z., Kotova T. V., Kovzel M. A. Forecasting and controlling the structure and properties of ultralow-carbon steels *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2021. Vol. 43. Pp. 753–768. ISSN1024-1809 (Print) E-ISSN: 2617-1511 (Online) [in English].
3. Proidak Yu. S., Kutsova V. Z., Kovzel M. A., Kotova T. V., Stesenko G. P. (2018). *Tonkolystova stal: monohrafiia [Thin Sheet Steel] / Dnipro: NMetAU, 2018. 311 s. [in Ukrainian]*.
4. Levchenko H. V., Samokhval V. M. *Tekhnolohiia yakosti i sertyfikatsiia [Quality Technology and Certification]. Dniprodzerzhynsk: DTTU, 2009. 117 s. [in Ukrainian]*.
5. Opryszko L. V., Suchomlin G. D., Stradomsky Z., Deyneko L. N. The influence of deformation scheme on grain boundaries structure of carbon steel boiler tubes. *Hutnik / Wiadomości Hutnicze*. 2014. Vol. 81. № 5. S. 308–313.

Котова Тетяна Володимирівна, к.т.н., доц. каф. матеріалознавства та термічної обробки металів, тел. +38 063-404-37-72, tatyana.kotova.1805@gmail.com.

Носко Ольга Анатоліївна, декан, к.т.н., доц. каф. покриттів, композиційних матеріалів і захисту металів, тел. +380 063-689-99-81, olganosko30@gmail.com.

Аюпова Тетяна Анатоліївна, к.т.н., доц. каф. матеріалознавства і термічної обробки металів, тел. +38 050-101-52-03, tanyaayupova@ukr.net.

Волинчук Владислав Олегович, студент, каф. матеріалознавства та термічної обробки металів, тел. +38 063- 230-64-84, volynchukvlad@outlook.com.

Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, місто Дніпро, 49010, Україна.

The influence of rolling at subcritical temperatures on the low-carbon steel structure and properties formation

Abstract Problem. In practice, the rolling of a low-carbon steel sheet due to significant heat losses ends in the austenite – ferrite two-phase structure region, which leads to the metal heterogeneous structure

formation, that decreases the sheet steel properties of the and its ability to be drawn. Adverse temperature conditions characteristic of traditional hot rolling technology can be prevented by metal processing in the single-phase ferrite structure region below the critical point Ar_1 . Rolling of a thin sheet in the subcritical temperature range will ensure obtaining a uniform metal structure, which determines the level of its mechanical properties, as well as the quality of stamped parts. **Goal.** The purpose of the work is study the rolling modes influence at subcritical temperatures on the low-carbon steel structure and properties formation. **Methodology.** The microstructure of 08ps steel samples was studied using a metallographic and electron microscope JSM-840 with a "Link-860/500" microanalysis system, the 08ps steel samples cross-section fine structure was studied using an electron microscope JEM-200Cx. The metal mechanical properties complex was determined by standard tensile test methods. **Results.** The 08ps steel structure and properties after rolling at subcritical temperatures were studied. The comparative analysis of the fine structure of the initial blank and deformed samples of low-carbon steel was carried out. It was established that changes are observed in the structure of the deformed samples and the initial blank, which indicate the polygonization and recrystallization processes implementation and do not provide the of metal mechanical properties level provided for by DSTU 2834-94. **Originality.** The thin structure of a 08ps steel sheet deformed in the subcritical temperature range with air cooling was studied. The development differs in the temperatures of the beginning and end of rolling, as well as the cooling rate in the

post-deformation period. It allows to expand theoretical ideas about the patterns of 08ps deformed steel structure formation and to use them in practice.

Practical value. The results of the work can be applied in determining rational processing modes, which involve rolling at subcritical temperatures, to increase the complex metal properties and obtain high-quality parts by cold stamping.

Key words: low-carbon steel, hot rolling, microstructure, mechanical properties.

Kotova Tetiana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, tatyana.kotova.1805@gmail.com, tel. +38 063-404-37-72,

Nosko Olha, Dean, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Coatings, Composite Materials and Protection of Metals, olganosko30@gmail.com, phone +380 063-689-99-81,

Aiupova Tetyana, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, tanyaayupova@ukr.net, Phone +38 050-101-52-03,

Volynchuk Vladyslav, student, the Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, volynchukvlad@outlook.com, tel. +38 063-230-64-84

Ukrainian State University of Science and Technology, st. Lazaryan, 2, Dnepr city, 49010, Ukraine.
