

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Подольської Олени Анатоліївни на тему «Закономірності впливу структурної неоднорідності та гарячої пластичної деформації доевтектоїдної сталі на надійність залізничних осей», подану на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»

Актуальність теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Подольської Олени Анатоліївни присвячена дослідженню закономірностей формування структурної неоднорідності доевтектоїдних сталей, які застосовуються для виготовлення залізничних осей, та встановленню її впливу на механічні властивості й опір металу втомному руйнуванню.

Актуальність роботи визначається тим, що залізничні осі є відповідальними елементами рухомого складу, для яких особливе значення мають стабільність властивостей металу та опір багатоцикловому навантаженню. У дисертації обґрунтовано, що структурний стан осевої сталі формується не на одному технологічному етапі, а є результатом послідовної дії процесів кристалізації, гарячої пластичної деформації та термічної обробки. Тому оцінювання лише кінцевої мікроструктури без урахування її походження не дає повного уявлення про причини неоднорідності та її вплив на експлуатаційні характеристики.

Важливим аспектом роботи є перехід від опису окремих проявів структурної неоднорідності до їх кількісного оцінювання та встановлення зв'язку з втомною довговічністю. Саме такий підхід дозволяє пов'язати металургійні й технологічні фактори з експлуатаційними властивостями готових залізничних осей.

Тема дисертаційної роботи є актуальною, відповідає сучасним завданням матеріалознавства та має безпосереднє практичне спрямування.

Загальна характеристика дисертації

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний об'єм дисертаційної роботи складає 181 сторінку, у роботі міститься 85 рисунків та 29 таблиць.

Робота побудована послідовно: спочатку розглянуто стан проблеми та вимоги до осевих сталей, далі наведено матеріали й методи дослідження, після чого послідовно досліджено формування структури, її зміни під час технологічної обробки та вплив отриманого структурного стану на механічні властивості й втомну довговічність.

Особливістю роботи є дослідження сталей марок EA1N, OC та F у різних технологічних станах, зокрема після гарячої пластичної деформації та термічної обробки. Це дало можливість не обмежуватися однією конкретною сталлю або одним технологічним станом, а простежити закономірності формування структурної неоднорідності залежно від хімічного складу та технологічного впливу.

У першому розділі розглянуто сучасний стан проблеми виробництва та експлуатації залізничних осей. Проаналізовано вимоги до хімічного складу сталей марок EA1N, OC та F, що застосовуються для їх виготовлення. Встановлено відмінності між сталями за вмістом вуглецю, марганцю та кремнію, зокрема нижчий вміст вуглецю в EA1N та ширший діапазон його вмісту у сталі F.

Окрему увагу приділено причинам виникнення структурної та хімічної неоднорідності й сучасним уявленням про втомне руйнування осевих сталей. Проведений аналіз створює основу для подальшого експериментального дослідження та дає змогу розглядати структурні зміни у взаємозв'язку з технологією отримання металу.

Другий розділ присвячений матеріалам та методам дослідження. Позитивно оцінюю використання комплексу сучасних та усталених методів, серед яких металографічний аналіз, оптична та растрова електронна мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, термодинамічне моделювання, цифрова обробка зображень, механічні випробування та фрактографічний аналіз. Обраний комплекс методів відповідає поставленим завданням і дає змогу встановити взаємозв'язок між особливостями мікроструктури та результатами механічних і втомних випробувань.

Застосування цифрового аналізу дозволило перейти до кількісної оцінки окремих параметрів структури, що надалі використано під час побудови залежності між структурною неоднорідністю та втомною довговічністю.

Третій розділ присвячено дослідженню формування макро- і мікроструктури та механічних властивостей досліджуваних сталей.

У цьому розділі послідовно простежено вплив хімічного складу на структурний стан металу. Особливу увагу приділено урахуванню вмісту та співвідношенню вуглецю, кремнію та марганцю.

Одним із важливих результатів є встановлення того, що характер ферито-перлітної структури, дендритної будови та фазового складу визначається не тільки абсолютним вмістом Mn і Si, а й співвідношенням між ними. Результати рентгенофазового аналізу підтверджують залежність інтенсивності дифракційних максимумів фаз FeMn_4 , Fe_2Si та FeSi від параметра Mn/Si .

Заслугове на увагу і встановлений вплив хімічного складу на ефективність подальшої термічної обробки. Зокрема, авторкою визначено граничний вміст вуглецю близько 0,45 %, нижче якого додаткова нормалізація

після гарячої пластичної деформації не забезпечує підвищення твердості, тоді як за вмісту вуглецю понад 0,45 % така обробка є ефективною.

Цей результат має практичний інтерес, оскільки демонструє, що доцільність певного технологічного впливу необхідно розглядати з урахуванням хімічного складу конкретної сталі.

Четвертий розділ присвячено дослідженню змін структурної неоднорідності після гарячої пластичної деформації промислових зразків. Розглянуто різні режими деформації осьової заготовки: прокату на пілігримовому стані, протягання на гідравлічному пресі та прокату на ТЗС. Для сталі марки F оцінено механічні характеристики, середній розмір дендритної структури, об'ємну частку фериту та розмір дійсного зерна, що дозволило порівняти структурний стан металу після різних способів деформаційної обробки.

Особливу увагу приділено результатам втомних випробувань окремих зразків з різною структурою, які продемонстрували значну різницю у довговічності. Так, при напруженні 286,31 МПа кількість циклів до руйнування становила 886 000, тоді як при 271,50 МПа - 3 762 000 циклів; один зі зразків при 267,57 МПа витримав 5 000 000 циклів без руйнування. Встановлено зв'язок цих результатів із мікроструктурою: вища втомна довговічність відповідала більш однорідному структурному стану, тоді як знижена довговічність супроводжувалася вираженою неоднорідністю та грубими ліквацийними ділянками.

У п'ятому розділі найбільш повно розкрито питання впливу структурної неоднорідності на опір металу втомному руйнуванню. Проведено дослідження металу осей у різних технологічних станах, зокрема після гарячої пластичної деформації та термічної обробки, проаналізовано розподіл структурних характеристик за перерізом та зіставлено отримані результати з показниками втомної довговічності. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості не лише фіксувати структурну неоднорідність, а й кількісно враховувати її під час оцінювання втомної поведінки металу. Водночас дисертація містить і порівняльні результати для різних способів виготовлення осей. Зокрема, для осі EA1N після гарячої пластичної деформації встановлено підвищення границі витривалості поверхневих шарів на 3,6 % порівняно з віссю без кування. Для сталі F поверхневі шари характеризувалися в 1,15–2,6 рази вищою втомною довговічністю порівняно з шарами на глибині половини радіуса.

Ці результати доповнюють математичну модель і показують, що структурна неоднорідність має значення не тільки на рівні локальної ділянки мікроструктури, а й при оцінюванні властивостей металу за перерізом реального виробу.

Оцінка наукової новизни

Наукова новизна роботи полягає в отриманні комплексу взаємопов'язаних результатів щодо формування та зміни структурної неоднорідності на різних етапах технологічної обробки металу.

Встановлено сім характерних типів структурної неоднорідності в осьових ферито-перлітних сталях та визначено діапазони вмісту вуглецю, кремнію й марганцю, за яких вони формуються. Показано, що кремній сприяє утворенню ненаправлених феритних виділень, тоді як марганець пов'язаний із формуванням ліквацийних ділянок та структур типу відманштеттового фериту.

Встановлено вплив співвідношення Mn/Si на формування дендритної, ферито-перлітної структури та фазового складу. Це дозволило уточнити вплив хімічного складу не лише через абсолютний вміст окремих елементів, а через їх співвідношення.

Важливим результатом також є узагальнення закономірності формування структурної неоднорідності ферито-перлітних осьових сталей залежно від хімічного складу. Виявлено, що характер феритних виділень змінюється від направлених та дендритоподібних до більш рівномірного розподілу з ліквацийними зонами зі зростанням вмісту вуглецю, причому оптимальна однорідність досягається за його середніх значень.

Встановлено диференційовану роль легуючих елементів: кремній сприяє утворенню ненаправлених феритних структур, тоді як марганець – ліквацийних ділянок і кристалографічно орієнтованих виділень. При цьому встановлено, що ключовим параметром, який визначає кінцеву структуру, є співвідношення Mn/Si, а не абсолютний вміст окремих елементів.

Найбільш важливим положенням наукової новизни є кількісне встановлення залежності між площею структурної неоднорідності та втомною довговічністю. Для сталі марки F показано, що площа неоднорідних ділянок до 43 % може супроводжуватися зниженням довговічності до 300 тис. циклів, а збільшення площі неоднорідності на 1 % відповідає зниженню довговічності приблизно на 42 500 циклів за напружень 286–295 МПа.

Практичне значення роботи

Практична цінність дисертації пов'язана насамперед із можливістю використання встановлених закономірностей при виборі складу сталі та параметрів технологічної обробки залізничних осей.

Отримані результати дозволяють враховувати співвідношення Mn/Si та вміст вуглецю під час вибору хімічного складу осьової сталі. Це може бути використано для прогнозування особливостей кристалізації та схильності металу до формування структурної неоднорідності.

Окреме практичне значення мають результати порівняння різних способів гарячої пластичної деформації. За результатами роботи для досліджуваних умов рекомендовано прокатку на пілігримовому стані; для

сталі марки EA1N гаряча пластична деформація забезпечила підвищення границі витривалості поверхневих шарів на 3,6 %. Розроблені рекомендації передбачають, зокрема, підтримання вмісту вуглецю ближче до 0,5 % мас., обмеження співвідношення Mn/Si для сталей EA1N та ОС на рівні не більше 3 та його значення не менше 2,5 для сталі F.

Важливим результатом роботи стало практичне застосування отриманих результатів у промислових умовах. Науково обґрунтовані технологічні рекомендації були використані для вдосконалення технології виробництва осей в умовах ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ».

Отже, практичне значення дисертації полягає у можливості використання її результатів для контролю структурного стану, вибору складу сталі, удосконалення деформаційної обробки та оцінювання втомної довговічності готових осей.

Обґрунтованість і достовірність результатів

Достовірність результатів визначається поєднанням різних методів дослідження та зіставленням даних, отриманих незалежними способами.

Зокрема, результати щодо впливу хімічного складу та співвідношення Mn/Si розглянуто з використанням металографічних, рентгеноструктурних і розрахункових даних. Результати щодо втомної поведінки зіставлено зі структурними характеристиками конкретних зразків. Це дозволило простежити зв'язок між локальними особливостями структури та кількістю циклів до руйнування.

Достовірність отриманих результатів підтверджується їх узгодженістю для лабораторних і промислових матеріалів, а також порівнянням структурних характеристик після різних технологічних способів виготовлення осевих заготовок. Отримані результати є обґрунтованими та відповідають меті й поставленим завданням роботи.

Повнота опублікування результатів

Результати дисертаційної роботи мають достатню апробацію. За матеріалами дослідження опубліковано більше 20 наукових праць, серед яких 4 статті у виданнях, що індексуються Scopus та/або Web of Science Core Collection (Q3), 12 статей у фахових виданнях України, методичний посібник, 9 тез конференцій та свідоцтво про реєстрацію авторського права.

Тематика публікацій охоплює основні напрями дисертації: формування структурної неоднорідності, вплив хімічного складу та умов кристалізації, гарячу пластичну деформацію, механічні властивості та втомну довговічність.

Вважаю, що результати дисертації достатньо повно представлені у наукових публікаціях та апробовані на наукових конференціях.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У дисертації наведено результати дослідження структурного стану сталі після гарячої пластичної деформації та термічної обробки, а також відповідні механічні характеристики. Водночас було б доцільно більш детально узагальнити, які саме структурні параметри найбільшою мірою визначають зміну механічних властивостей досліджуваних сталей.

2. Під час аналізу впливу структурної неоднорідності на втомну довговічність основну увагу зосереджено на досліджуваних марках осьових сталей. Доцільно б було також оцінити можливість поширення встановлених закономірностей на інші конструкційні сталі, що застосовуються для аналогічних умов експлуатації.

3. У роботі наведено результати втомних випробувань зразків, отриманих із різних зон металу за перерізом. Водночас було б доцільно більш детально обговорити вплив місця відбору зразків у перерізі осі на отримані значення втомної довговічності.

4. У дисертації наведено результати дослідження кількох марок осьових сталей. Водночас було б цікаво більш чітко окреслити, які саме особливості їх хімічного складу найбільшою мірою визначають відмінності у формуванні структурної неоднорідності.

5. У дисертації представлено результати кількісного оцінювання структурної неоднорідності на окремих ділянках металографічних шліфів. Водночас доцільно було б ширше обґрунтувати вибір кількості та розташування полів зору, оскільки репрезентативність досліджуваної вибірки є важливою умовою достовірності кількісної оцінки.

Зазначені зауваження мають переважно характер побажань щодо розширення окремих аспектів обговорення та вдосконалення представлення результатів. Вони не ставлять під сумнів отримані результати та не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Подольської Олени Анатоліївни на тему «Закономірності впливу структурної неоднорідності та гарячої пластичної деформації доевтектоїдної сталі на надійність залізничних осей» є завершеним самостійним науковим дослідженням, присвяченим актуальній проблемі матеріалознавства.

У роботі комплексно проаналізовано формування структурної неоднорідності на різних етапах отримання та технологічної обробки осьових сталей, визначено вплив хімічного складу й технологічних параметрів на структурний стан, а також встановлено взаємозв'язок між структурними характеристиками, механічними властивостями та втомною довговічністю металу.

Дисертаційна робота за актуальністю теми, рівнем наукової новизни, обґрунтованістю отриманих результатів, їх теоретичним і практичним значенням відповідає вимогам, визначеним «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами).

Вважаю, що дисертаційна робота Подольської Олени Анатоліївни відповідає встановленим вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а її авторка заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

Кандидат технічних наук,
науковий співробітник лабораторії проблем
структурування і властивостей чорних
металів відділу термічної
обробки металу для машинобудування
Інституту чорної металургії
ім. З.І. Некрасова НАН України

Олена БАРАНОВСЬКА

Підпис к.т.н., Барановської О.Є. засвідчую:

Т.в.о. ученого секретаря
Інституту чорної металургії
Ім. З.І. Некрасова НАН України,
кандидат технічних наук



Лариса ГАРМАШ