

ВІДГУК

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

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота Подольської Олени Анатоліївни присвячена встановленню закономірностей формування структурної неоднорідності доєвтектоїдних сталей, що застосовуються для виготовлення залізничних осей, дослідженню її трансформації в процесі гарячої пластичної деформації та визначенню впливу структурного стану металу на його механічні властивості й опір втомному руйнуванню.

Актуальність обраної тематики зумовлена високими вимогами до надійності залізничних осей, які є відповідальними елементами рухомого складу та працюють в умовах багатоциклового навантаження. За таких умов навіть локальна структурна неоднорідність може створювати сприятливі умови для зародження та розвитку втомних тріщин, що безпосередньо впливає на довговічність виробів.

Особливого значення набуває встановлення причин формування структурної неоднорідності на різних етапах виробництва. У дисертації послідовно розглянуто вплив хімічного складу, процесів кристалізації, гарячої пластичної деформації та термічної обробки на кінцевий структурний стан осевої сталі. Такий комплексний підхід дозволяє розглядати структурну неоднорідність як результат взаємодії металургійних і технологічних чинників, а не лише як окрему характеристику готового металу.

Отже, тема дисертаційної роботи є актуальною, має наукове та практичне значення і відповідає сучасним завданням матеріалознавства залізничних сталей.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота виконана в Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України та відповідає науковому напрямку досліджень установи, пов'язаному з вивченням структури і властивостей сталей залізничного призначення та вдосконаленням технології їх виробництва.

Мета та завдання роботи сформульовані відповідно до поставленої проблеми. Вони охоплюють дослідження процесів формування дендритної структури та структурної неоднорідності залежно від хімічного складу, оцінювання впливу гарячої пластичної деформації, дослідження механічних властивостей і втомної довговічності осьових сталей та розроблення рекомендацій щодо вдосконалення технології їх виробництва.

Дисертаційна робота включає вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаних джерел та чотири додатки. Загальний обсяг роботи становить 181 сторінку. Дисертація містить 85 рисунків і 29 таблиць. Структура дисертації є логічною, а послідовність розміщення матеріалу відповідає етапам проведеного дослідження.

У першому розділі здійснено аналіз сучасного стану проблеми. Розглянуто вимоги національних і міжнародних нормативних документів до хімічного складу, властивостей осьових сталей та залізничних осей. Окремо проаналізовано особливості їх виробництва, вплив хімічного складу на структурний стан металу, питання формування структурної неоднорідності та механізми втомного руйнування. Проведений аналіз дозволив обґрунтувати напрям подальших досліджень.

Другий розділ містить опис досліджуваних матеріалів та методів дослідження. Автором використано комплекс експериментальних і розрахункових методів, серед яких металографічний аналіз, електронна мікроскопія, рентгеноструктурні дослідження, механічні випробування, фрактографічний аналіз та комп'ютерне моделювання. Для дослідження процесів кристалізації та деформації використано програмні засоби Thermo-Calc і QForm, а для кількісної оцінки структурних характеристик – цифровий аналіз зображень.

Третій розділ присвячено дослідженню впливу хімічного складу та умов кристалізації вуглецевих сталей на формування структурної неоднорідності. Автором досліджено вплив вмісту вуглецю (0,36–0,59 %), марганцю (0,56–0,95 %) та кремнію (0,12–0,44 %) на дендритну структуру, морфологію ферито-перлітної структури, твердість та фазовий склад сталі. Позитивним є те, що експериментальні результати доповнено термодинамічними розрахунками, що дозволило пов'язати спостережувані структурні особливості з фазовими перетвореннями під час кристалізації.

Четвертий розділ логічно продовжує дослідження та присвячений визначенню впливу гарячої пластичної деформації і термічної обробки на зміну структурного стану та механічних властивостей осьових сталей. Розроблено рекомендації стосовно технології виготовлення осей з урахуванням результатів оцінювання втомної довговічності металу по всьому перерізу та встановлених закономірностей пророблення структури за різних умов деформаційної обробки.

У п'ятому розділі досліджено вплив структурної неоднорідності на опір втомному руйнуванню. Автором проведено металографічний і фрактографічний аналіз, зіставлено структурний стан металу з результатами випробувань на втому та встановлено зв'язок між площею структурної неоднорідності та втомною довговічністю. Важливо, що автор застосувала комплексний підхід «технологія-структура-експлуатаційна властивість», що дозволило обґрунтовано довести, що визначальним фактором втомної міцності є не стільки абсолютний рівень механічних властивостей, скільки рівномірність структури по всьому перерізу, а також локалізація та ступінь вираженості ліквідаційних ділянок.

У цілому зміст дисертації відповідає поставленій меті та завданням, а отримані результати послідовно формують цілісне наукове дослідження.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота виконана державною мовою на належному науковому рівні. Матеріал викладено послідовно та логічно, текст має змістовну цілісність і завершеність. Автор використовує загальноприйняту наукову та матеріалознавчу термінологію.

Оформлення дисертації здійснено відповідно до чинних нормативних вимог, зокрема вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 року № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (зі змінами).

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Обґрунтованість отриманих результатів визначається комплексністю проведених досліджень та використанням взаємодоповнювальних методів аналізу. У роботі поєднано дослідження хімічного складу, структури, фазового стану, механічних властивостей та характеристик втомного руйнування.

Важливим є зіставлення результатів, отриманих різними методами. Встановлені закономірності впливу Mn/Si на формування структури доповнюються результатами термодинамічного моделювання та рентгенофазових досліджень. У свою чергу, висновки щодо впливу структурної неоднорідності на втомну довговічність підтверджуються результатами механічних випробувань та аналізу поверхонь руйнування.

Окремо слід відзначити використання як лабораторних плавок, так і промислових матеріалів. Це дозволило дослідити закономірності формування структури в широкому діапазоні хімічних складів та перевірити отримані результати на матеріалі реального виробництва.

У цілому наукові положення, висновки та практичні рекомендації дисертації мають достатню експериментальну основу, узгоджуються між собою та відповідають поставленим завданням.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна роботи полягає у встановленні закономірностей формування структурної неоднорідності доевтектоїдних осьових сталей та визначенні її зв'язку з технологічними параметрами, структурним станом і втомною довговічністю.

Перше положення наукової новизни стосується встановлення впливу співвідношення Mn/Si та вмісту вуглецю на умови кристалізації та формування структурної неоднорідності. Автором показано, що збільшення співвідношення Mn/Si до 5 за одночасного зменшення вмісту вуглецю від 0,45 до 0,36 % супроводжується розширенням температурного інтервалу існування δ -фази та збільшенням її кількості до 30 %. Це положення обґрунтоване, оскільки воно підтверджене результатами експериментальних досліджень і термодинамічного моделювання.

Друге положення характеризує встановлений взаємозв'язок між параметром Mn/Si та фазовим складом осьових ферито-перлітних сталей із вмістом 0,36–0,59 % C, 0,56–0,95 % Mn та 0,12–0,44 % Si. Позитивним є те, що цей результат розглядається не ізольовано, а у взаємозв'язку з результатами рентгенофазових досліджень та особливостями формування структурної неоднорідності.

Третє положення стосується встановлених морфологічних проявів структурної неоднорідності залежно від хімічного складу та співвідношення Mn/Si. Зокрема, для сталей із вмістом вуглецю 0,36–0,46 % характерними є дендритоподібний та направлений ферит, тоді як при 0,56–0,59 % C формується більш однорідна ферито-перлітна структура. Найменший рівень структурної неоднорідності спостерігається при концентрації вуглецю близько 0,5 %. Вважаю, що систематизація цих проявів є важливим результатом роботи, оскільки дозволяє пов'язати хімічний склад сталі з особливостями її структурного стану.

Четверте положення полягає у встановленні кількісного зв'язку між площею структурної неоднорідності та втомною довговічністю сталі марки F. Показано, що при збільшенні площі структурної неоднорідності до 43 % довговічність зменшується до 300 тис. циклів, а збільшення площі неоднорідності на 1 % супроводжується зниженням довговічності приблизно на 42,5 тис. циклів за рівня напружень 286–295 МПа. Отримана лінійна регресійна модель має коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,93$, що підтверджує тісний статистичний зв'язок між досліджуваними показниками в межах отриманих експериментальних даних.

Узагальнюючи, можна зазначити, що положення наукової новизни логічно пов'язані між собою: від закономірностей формування первинної структури автор переходить до аналізу її трансформації під час технологічної обробки, а далі – до оцінювання впливу структурного стану на втомну

довговічність. Це забезпечує цілісність наукової концепції дисертаційної роботи.

Практичне значення одержаних результатів

Практична цінність роботи визначається можливістю використання встановлених закономірностей для удосконалення технології виробництва залізничних осей та підвищення стабільності їх експлуатаційних характеристик.

Перш за все, практичне значення мають результати щодо вибору та контролю хімічного складу осевих сталей. Встановлені закономірності впливу співвідношення Mn/Si і вмісту вуглецю на структуроутворення створюють можливість прогнозувати схильність сталі до формування структурної неоднорідності ще на етапі формування хімічного складу.

Другим важливим напрямом практичного використання є вибір способу та параметрів гарячої пластичної деформації. Отримані результати дозволяють оцінювати ефективність деформаційного пророблювання металу та враховувати особливості первинної структури при виборі технологічних режимів. Це має безпосереднє значення для забезпечення більшої однорідності властивостей металу по перерізу осі.

Практично значущим є встановлення кількісної залежності між площею структурної неоднорідності та втомною довговічністю. Значення 42,5 тис. циклів на 1 % зміни площі неоднорідності за досліджених рівнів напружень може бути використане як кількісний орієнтир при оцінюванні впливу структурного стану на ресурс осевої сталі.

Практична спрямованість роботи підтверджується впровадженням результатів у виробничу діяльність ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ», а також використанням результатів у науковій та освітній діяльності.

Таким чином, результати дисертації мають не лише теоретичну цінність для розуміння процесів структуроутворення, а й практичне значення для вдосконалення технології виробництва осевих сталей.

Повнота викладення результатів дослідження в наукових публікаціях

Основні результати дисертаційної роботи достатньою мірою висвітлені у наукових публікаціях автора. Опубліковані матеріали охоплюють результати дослідження хімічного складу, процесів кристалізації, структурної неоднорідності, гарячої пластичної деформації, механічних властивостей та втомної довговічності осевих сталей.

Публікаційна активність автора забезпечила апробацію основних положень роботи та їх представлення у фаховому науковому середовищі. Зміст публікацій відповідає основним результатам дисертаційного дослідження.

Зауваження до дисертаційної роботи

Поряд із загальною позитивною оцінкою роботи вважаю за необхідне висловити декілька зауважень і побажань дискусійного характеру.

1. У дисертаційній роботі досліджено вплив умов кристалізації на формування дендритної структури сталі. Вважаю, що було б доцільно більш детально обговорити вплив швидкості охолодження під час кристалізації на параметри дендритної структури та подальше формування структурної неоднорідності в готовому металі.

2. Значну увагу приділено впливу співвідношення Mn/Si на формування структурної неоднорідності. Разом із тим, на думку опонента, було б доцільно більш чітко розмежувати вплив самого співвідношення Mn/Si та абсолютного вмісту марганцю і кремнію, оскільки зміна цих параметрів у досліджуваних сталях відбувається одночасно.

3. У роботі наведено результати дослідження структурного стану осьових сталей після різних технологічних впливів. Водночас було б доцільно більш детально обговорити питання успадкування структурної неоднорідності після гарячої пластичної деформації та термічної обробки, зокрема наскільки повністю початкова дендритна структура може бути нівельована під час подальшої технологічної обробки.

4. Автором досліджено вплив структурної неоднорідності на механічні властивості та втомну довговічність осьових сталей. Водночас, на думку опонента, важливо було б більш детально розглянути взаємозв'язок між зміною твердості та структурного стану металу по перерізу осьової заготовки, оскільки неоднорідність властивостей може бути одним із чинників локалізації втомного руйнування.

5. У роботі для оцінювання втомної міцності металу залізничних осей використано випробування при чистому згині з обертанням за коефіцієнта асиметрії циклу $R = -1$. Водночас було б доречно обґрунтувати, чому було обрано саме такі умови циклічного навантаження.

Наведені зауваження мають переважно дискусійний та рекомендаційний характер, не стосуються основних результатів роботи і не знижують її загальної наукової та практичної цінності.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота Подольської Олени Анатоліївни «Закономірності впливу структурної неоднорідності та гарячої пластичної деформації доевтектоїдної сталі на надійність залізничних осей» є завершеним самостійним науковим дослідженням, спрямованим на вирішення актуального науково-практичного завдання матеріалознавства.

У роботі встановлено закономірності впливу хімічного складу та умов кристалізації на формування структурної неоднорідності доевтектоїдних осьових сталей, досліджено її трансформацію під час гарячої пластичної

деформації та визначено взаємозв'язок структурного стану з механічними властивостями і втомною довговічністю металу.

За актуальністю теми, науковою новизною отриманих результатів, рівнем їх обґрунтованості, теоретичним і практичним значенням дисертаційна робота відповідає вимогам, установленим 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).

Подольська Олена Анатоліївна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

Кандидат технічних наук, доцент,
проректор з науково-педагогічної,
навчально-виховної роботи та
перспективного розвитку
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка»

 Сергій ФЕДОРЯЧЕНКО

Підпис *Федорченко*
засвідчую:
вчений секретар
Вченої ради
Каленюк

