

АНОТАЦІЯ

Подольська О.А. Закономірності впливу структурної неоднорідності та гарячої пластичної деформації доевтектоїдної сталі на надійність залізничних осей.
– Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство. – Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, Дніпро, 2026.

Дисертаційна робота присвячена встановленню закономірностей формування структурної неоднорідності осьових вуглецевих сталей, дослідженню її успадкування на різних стадіях технологічного процесу виробництва залізничних осей та оцінюванню впливу хімічного складу, гарячої пластичної деформації й термічної обробки на структуру, механічні властивості та втомну довговічність металу.

Актуальність роботи визначається необхідністю підвищення експлуатаційної надійності залізничних осей, які належать до найбільш відповідальних деталей рухомого складу та працюють в умовах багатоциклового навантаження. Сучасні вимоги міжнародних стандартів до якості осьових сталей постійно зростають, що потребує поглибленого дослідження процесів формування мікроструктури металу, причин виникнення структурної неоднорідності та їх впливу на механічні характеристики і втомну міцність готових виробів.

У роботі проведено комплексний аналіз сучасного стану досліджень, присвячених формуванню структури, властивостей та забезпеченню надійності осьових сталей. Виконано порівняльний аналіз вимог національних і міжнародних нормативних документів (ДСТУ ГОСТ 31334:2009, ДСТУ EN 13261:2022, AAR M-101-2016 та інших), що регламентують хімічний склад, механічні властивості, металургійну чистоту та експлуатаційну надійність залізничних осей. Показано, що найбільш жорсткі вимоги до металургійної чистоти та допустимого рівня неметалевих включень встановлені європейськими стандартами, що пов'язано із забезпеченням високої втомної довговічності виробів.

За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що структурна неоднорідність формується ще під час кристалізації металу внаслідок дендритної ліквідації, мікросегрегації легувальних елементів та будови кристалів нових фаз. Незважаючи на подальшу гарячу пластичну деформацію, повне усунення спадкової неоднорідності досягається не завжди. Саме залишкові прояви ліквідації істотно впливають на кінцеву мікроструктуру, механічні властивості та опір металу втомному руйнуванню. При цьому встановлено недостатню дослідженість спільного впливу співвідношення вмісту марганцю та кремнію на формування структурної неоднорідності осьових сталей, що стало підставою для проведення даного дослідження.

Для досягнення поставленої мети сформовано комплекс сучасних експериментальних та розрахункових методів дослідження. Виплавку дослідних плавок здійснювали методом переплавлення в індукційній печі без примусового окислення домішок. Металографічні дослідження виконувались із застосуванням оптичної та растрової електронної мікроскопії. Кількісний аналіз мікроструктури проводився з використанням програмного забезпечення ImageJ, статистичну обробку результатів виконували у середовищі OriginLab, а моделювання фазових перетворень під час кристалізації – із застосуванням програмного комплексу ThermoCalc. Механічні властивості визначали відповідно до вимог чинних стандартів. Додатково використано методику аналізу міжатомної взаємодії на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку, що дозволило оцінити комплексний вплив хімічного складу на структурний стан і властивості осьових сталей.

У роботі виконане комплексне дослідження закономірностей формування мікроструктури осьових сталей у литому стані, після гарячої пластичної деформації та після завершальної термічної обробки. Проведено кількісне визначення співвідношення фериту і перліту, досліджено зміну твердості залежно від стану металу (литий, деформований, термічно оброблений стан) та встановлено взаємозв'язок між хімічним складом та параметрами мікроструктури.

Підтверджено, що загалом зі збільшенням вмісту вуглецю збільшується кількість перлітної фази, але у литому сталі спостерігали певне плато в області 0,48-0,56%, після пластичної деформації тенденція до збільшення кількості перліту проявляється сильніше, але має певний розкид значень. У стані після термічної обробки кількість перліту збільшується, ця закономірність стає більш стабільною. Чітких залежностей, щодо впливу кремнію та марганцю не спостерігається. Виявлено взаємозв'язок між вмістом ванадію та формуванням перлітної складової після гарячої пластичної деформації й термічної обробки. Показано неоднозначний вплив алюмінію на кількість фериту залежно від конкретного хімічного складу сталі.

Аналіз впливу міжатомної взаємодії на твердість дослідних сталей показав існування характерної області значень параметра Z^Y (1,20-1,21), у межах якої змінюється характер взаємозв'язку між структурним станом металу та його твердістю після різних технологічних операцій. Отримані результати підтверджують доцільність використання параметрів міжатомної взаємодії як додаткового критерію прогнозування властивостей осьових сталей.

Отримані результати дозволили встановити закономірності формування та трансформації мікроструктури осьових сталей залежно від співвідношення базових хімічних елементів, а також показали, що від литого стану до завершальної термічної обробки спостерігається закономірне підвищення механічних властивостей.

Окремий розділ роботи присвячений дослідженню впливу технології гарячої пластичної деформації на структурну однорідність осьових заготовок. Проведено порівняльний аналіз різних способів прокатки чорнових осей зі сталі марки F відповідно до вимог стандарту AAR M-101-2016. Встановлено, що найбільш рівномірний розподіл пластичної деформації по всьому перерізу заготовки забезпечується під час прокатки на пілігримовому стані в один прохід. На відміну від цього, при прокатці на трубозаготівельному стані максимальне ущільнення металу локалізується в зоні $\frac{1}{2}$ радіуса осі. Більш рівномірний розподіл пластичної

деформації забезпечує ефективніше пророблення центральних шарів осьової заготовки, що зменшує прояви успадкованої структурної неоднорідності металу.

Результати випробувань на втому показали, що границя довговічності поверхневих шарів металу досягає 276 МПа, тоді як у внутрішніх шарах становить близько 267 МПа. Встановлено, що втомна міцність центральної частини осі практично не поступається показникам $\frac{1}{2}$ радіуса осі, що підтверджує ефективність сучасних технологій гарячої пластичної деформації. Разом із тим зниження втомної довговічності окремих зразків безпосередньо пов'язане з наявністю локальної структурної неоднорідності.

Під час дослідження промислових залізничних осей марки EA1N виробництва ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» встановлено істотний вплив структурної неоднорідності на експлуатаційну надійність виробів. Встановлено, що причиною зниженої довговічності осі, яка мала локальний підвищений ехо-сигнал при ультразвуковому контролі є не тільки більша кількість пор, але і більший об'єм ліквідаційних ділянок, в тому числі наявність грубого відманштеттевого фериту не лише в центрі, але й на $\frac{1}{2}$ радіуса осі.

Порівняльні дослідження осей, виготовлених із застосуванням операції кування та без неї, показали позитивний вплив кування на підвищення структурної однорідності поверхневих шарів металу та збільшення границі витривалості з 266 до 276 МПа.

Узагальнення результатів досліджень дозволило встановити, що основними чинниками, які визначають рівень втомної міцності осьових сталей, є ступінь структурної однорідності, характер успадкування дендритної ліквідації після гарячої пластичної деформації, а також рівномірність розподілу ферито-перлітної структури за перерізом осі.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації хімічного складу осьових сталей, удосконалення режимів гарячої пластичної деформації та термічної обробки, зменшення проявів структурної неоднорідності та забезпечення відповідності продукції вимогам сучасних міжнародних стандартів. Реалізація запропонованих рекомендацій сприятиме підвищенню втомної довговічності,

надійності та експлуатаційної безпеки залізничних осей. На основі науково обґрунтованих технологічних рекомендацій було вдосконалено технологію виробництва осей в умовах ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ».

Ключові слова: мікроструктура, вуглецева сталь, хімічний склад, термічна обробка, фазові перетворення, гаряча пластична деформація, твердість, залізничні осі, моделювання, прогнозна модель, легуючі елементи

SUMMARY

Podolska O.A. Regularities of the Influence of Structural Heterogeneity and Hot Plastic Deformation of Hypoeutectoid Steel on the Reliability of Railway Axles. – Qualifying scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 132 – Materials Science. – Z. I. Nekrasov Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2026.

The dissertation is devoted to establishing the regularities of structural heterogeneity formation in axle carbon steels, investigating its inheritance at different stages of the technological process of railway axle production, and evaluating the influence of chemical composition, hot plastic deformation, and heat treatment on the microstructure, mechanical properties, and fatigue life of the metal.

The relevance of the study is determined by the necessity to improve the operational reliability of railway axles, which are among the most critical components of rolling stock and operate under high-cycle loading conditions. Current international standards impose increasingly stringent requirements on the quality of axle steels, necessitating a comprehensive investigation of the processes governing the formation of the metal microstructure, the causes of structural heterogeneity, and their influence on the mechanical characteristics and fatigue strength of finished products.

A comprehensive analysis of the current state of research on the formation of the structure and properties of axle steels and the assurance of their reliability was carried

out. A comparative analysis of the requirements of national and international regulatory documents (DSTU GOST 31334:2009, DSTU EN 13261:2022, AAR M-101-2016, and others), which regulate the chemical composition, mechanical properties, metallurgical cleanliness, and operational reliability of railway axles, was performed. It was shown that the most stringent requirements for metallurgical cleanliness and the permissible level of non-metallic inclusions are established by European standards, which is associated with ensuring high fatigue life of the products.

Based on the analysis of the literature, it was established that structural heterogeneity is formed during metal solidification as a result of dendritic segregation, microsegregation of alloying elements, and the crystal structure of newly formed phases. Despite subsequent hot plastic deformation, the complete elimination of inherited heterogeneity is not always achieved. Residual manifestations of segregation significantly affect the final microstructure, mechanical properties, and fatigue resistance of the metal. At the same time, insufficient attention has been paid to the combined influence of the manganese-to-silicon ratio on the formation of structural heterogeneity in axle steels, which provided the basis for this study.

To achieve the research objectives, a comprehensive set of modern experimental and computational methods was employed. Experimental heats were produced by remelting in an induction furnace without forced oxidation of impurities. Metallographic investigations were carried out using optical and scanning electron microscopy. Quantitative microstructural analysis was performed using ImageJ software, statistical processing of the results was conducted in the OriginLab environment, and phase transformations during solidification were simulated using the ThermoCalc software package. Mechanical properties were determined in accordance with the requirements of current standards. In addition, the method of interatomic interaction analysis based on the concept of directional chemical bonding was applied, making it possible to evaluate the combined influence of chemical composition on the structural state and properties of axle steels.

The study presents a comprehensive investigation of the regularities governing the formation of the microstructure of axle steels in the as-cast state, after hot plastic

deformation, and after final heat treatment. The ferrite-to-pearlite ratio was quantitatively determined, changes in hardness depending on the metal condition (as-cast, deformed, and heat-treated) were investigated, and the relationship between chemical composition and microstructural parameters was established.

It was confirmed that, in general, an increase in carbon content leads to an increase in the amount of the pearlitic phase. However, in the as-cast steel, a certain plateau was observed within the range of 0.48–0.56% carbon. After plastic deformation, the tendency toward an increase in pearlite content became more pronounced, although with some scatter in the values. In the heat-treated condition, the amount of pearlite increased further, and this relationship became more stable. No clear dependences regarding the influence of silicon and manganese were observed. A relationship was identified between vanadium content and the formation of the pearlitic constituent after hot plastic deformation and heat treatment. The ambiguous influence of aluminum on the ferrite content depending on the specific chemical composition of the steel was also demonstrated.

The analysis of the influence of interatomic interactions on the hardness of the experimental steels revealed the existence of a characteristic range of the ZY parameter (1.20–1.21), within which the relationship between the structural state of the metal and its hardness after different technological operations changes. The obtained results confirm the feasibility of using interatomic interaction parameters as an additional criterion for predicting the properties of axle steels.

The obtained results made it possible to establish the regularities governing the formation and transformation of the microstructure of axle steels depending on the ratio of the principal chemical elements. They also demonstrated that mechanical properties increase consistently from the as-cast condition to the final heat-treated state.

A separate chapter of the dissertation is devoted to investigating the influence of hot plastic deformation technology on the structural homogeneity of axle billets. A comparative analysis of different rolling methods for rough-rolled F-grade steel axles in accordance with the requirements of the AAR M-101-2016 standard was carried out. It was established that the most uniform distribution of plastic deformation throughout the billet cross-section is achieved during rolling on a pilgrim mill in a single pass. In contrast,

during rolling on a tube billet mill, the maximum metal densification is localized in the region corresponding to one-half of the axle radius. A more uniform distribution of plastic deformation ensures more effective working of the central layers of the axle billet, thereby reducing the manifestations of inherited structural heterogeneity.

The fatigue test results showed that the endurance limit of the surface layers of the metal reaches 276 MPa, whereas in the inner layers it is approximately 267 MPa. It was established that the fatigue strength of the central part of the axle is practically equal to that at one-half of the axle radius, confirming the effectiveness of modern hot plastic deformation technologies. At the same time, the reduced fatigue life of individual specimens is directly associated with the presence of local structural heterogeneity.

During the investigation of industrial EA1N railway axles manufactured by PJSC "INTERPIPE NTZ", a significant influence of structural heterogeneity on the operational reliability of the products was established. It was found that the reduced durability of an axle exhibiting a locally increased echo signal during ultrasonic inspection was caused not only by a greater number of pores but also by a larger volume of segregation regions, including the presence of coarse Widmanstätten ferrite not only at the center but also at one-half of the axle radius.

Comparative studies of axles manufactured with and without the forging operation demonstrated the positive effect of forging on improving the structural homogeneity of the surface layers of the metal and increasing the endurance limit from 266 to 276 MPa.

The generalization of the research results made it possible to establish that the principal factors determining the fatigue strength of axle steels are the degree of structural homogeneity, the nature of dendritic segregation inheritance after hot plastic deformation, and the uniformity of ferrite-pearlite structure distribution throughout the axle cross-section.

The obtained results can be used to optimize the chemical composition of axle steels, improve the regimes of hot plastic deformation and heat treatment, reduce the manifestations of structural heterogeneity, and ensure compliance of the products with the requirements of modern international standards. The application of the proposed recommendations will enhance the fatigue life, increase the reliability, and improve the

operational safety of railway axles. Based on scientifically substantiated technological recommendations, the axle manufacturing technology under the production conditions of PJSC "INTERPIPE NTZ" was improved.

Keywords: microstructure, carbon steel, chemical composition, heat treatment, phase transformations, hot plastic deformation, hardness, railway axles, modeling, predictive model, alloying elements