

АНОТАЦІЯ

Олійник Е. В. Особливості формування структури та властивостей прокату підвищеної деформівності з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей для виготовлення зварювального дроту. – 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 комплексному дослідженню закономірностей структуроутворення й формування комплексу механічних властивостей бунтового прокату з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей, а також науковому обґрунтуванню та розробленню технології його знеміцнювального термомеханічного оброблення для подальшого енергоефективного виготовлення зварювальних матеріалів.

У роботі проаналізовано сучасні тенденції та проблеми виробництва прокату і дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення. Показано, що одним із найбільш актуальних завдань, яке наразі стоїть перед виробниками бунтового прокату зварювального призначення у всьому світі, є максимальна пластифікація металу в стані постачання металовиробним підприємствам, при цьому раціональний мікроструктурний дизайн відіграє ключову роль під час виготовлення високопластичного прокату. Формування твердих складників (мартенситу, бейніту або їхньої суміші) у структурі металу є небажаним через високий ризик руйнування дроту в процесі інтенсивного холодного деформування волочінням, водночас відомості про утворення таких структур на етапі виготовлення прокату в умовах металургійних підприємств вкрай обмежені, а деякі аспекти мікроструктурної еволюції та особливостей утворюваних фаз наразі залишаються недостатньо вивченими.

За результатами теоретичних досліджень розвинуто подальші уявлення щодо фундаментальних засад знеміцнювального термомеханічного оброблення бунтового прокату з низьковуглецевих сталей у потоці сучасних технологічних ліній, що ґрунтується на створенні специфічного структурного стану гарячедеформованого аустеніту перед початком його розпаду, який характеризується дрібним розміром зерна за рахунок розвитку динамічної рекристалізації й зниженою густиною дислокацій та їх упорядкуванням завдяки наступному перебігу статичного повернення та метадинамічної рекристалізації з одночасним пригніченням розвитку статичної рекристалізації. Така концепція є головною передумовою для формування більшої об'ємної частки поліедричного фериту і зниження вірогідності утворення структур бейнітного й мартенситного типів під час уповільненого охолодження металу з прокатного нагрівання.

З огляду на вимоги діючої нормативної документації та специфікацій кращих світових і вітчизняних виробників бунтового прокату з низьковуглецевих легованих сталей визначено цільові показники якості відповідної металопродукції з урахуванням характеристик самих зварювальних матеріалів.

Вивчено закономірності кінетики розпаду аустеніту сталі CrMoV1Si (аналог Св-08ХГСМФА) під час безперервного охолодження у широкому інтервалі швидкостей ($116-0,05$ °C/c) та побудовано відповідну термокінетичну діаграму. Головною особливістю фазово-структурних перетворень в досліджуваній сталі є те, що за уповільненого охолодження у інтервалі швидкостей $1,1-0,05$ °C/c реалізується складний дифузійно-проміжно-зсувний механізм, який обумовлює формування багатофазної структури, що складається з фериту, перліту, бейніту та високотвердого мартенситу в різних співвідношеннях, причому об'ємна частка мартенситу зростає по мірі зниження швидкості охолодження за рахунок більшого розвитку дифузійного насичення ділянок залишкового аустеніту вуглецем і марганцем до моменту початку його зсувного перетворення. За результатами

металографічного аналізу отримані дані систематизовано у вигляді структурної діаграми.

Методами растрової електронної мікроскопії, рентгеноспектрального мікроаналізу і Оже-електронної спектроскопії встановлено факт утворення високовуглецевого мартенситу (вміст C > 1 % ваг.) з високою твердістю (722–897 HV_{0,02}) під час уповільненого безперервного охолодження низьковуглецевої Cr-Mo-V сталі з аустенітної області до кімнатної температури. Такий мартенсит формується у вигляді відносно рівномірно розподілених дрібних зерен сфероподібної форми, які розташовані переважно на границях феритних зерен і в деяких випадках всередині них. Експериментальними даними підтверджено, що така мікроструктурна еволюція досліджуваної сталі обумовлена динамічною зміною хімічного складу окремих структурних складників у процесі зниження температури, насамперед дифузійним перерозподілом вуглецю, марганцю та кремнію між α та γ фазами.

Ґрунтуючись на положеннях нерівноважної термодинаміки розроблено розрахункову модель перерозподілу легувальних елементів у процесі формування структури сталі CrMoV1Si за уповільненого охолодження. Визначено величини термодинамічної сили для дифузії вуглецю, кінетичних коефіцієнтів та потоків термодинамічної системи, які описують кінетику структуроутворення досліджуваної сталі у процесі охолодження. Запропоновано вирази для розрахунку лінійних розмірів аустенітних і мартенситних ділянок, що формуються у результаті протікання дифузійних потоків вуглецю, марганцю і кремнію.

На засадах узагальнення результатів експериментальних і теоретичних досліджень запропоновано науково обґрунтований механізм формування ділянок високовуглецевого мартенситу в бунтовому прокаті з низьковуглецевих легованих сталей під час уповільненого безперервного охолодження з аустенітної області до кімнатної температури.

Досліджено вплив температурно-деформаційних умов оброблення на структуру і механічні властивості сталі CrMoV1Si. Отримані залежності твердості, границі плинності та границі міцності від параметрів оброблення дозволили визначити оптимальний температурний діапазон закінчення гарячого деформування прокату з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей (1050–1100 °C) з точки зору максимального знеміцнювання металу за умови стаціонарного режиму його охолодження.

За результатами лабораторного моделювання запропоновано та випробувано у промислових умовах інноваційну технологію знеміцнювального термомеханічного оброблення бунтового прокату малого діаметру (5,5 мм) з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення на лінії Стелмор, яка включає стадію водяного охолодження металу від температури завершення гарячого деформування 1050 °C до 950 °C та подальше диференційоване триетапне повітряне охолодження з визначеними швидкостями у різних температурних інтервалах: 950–850 °C зі швидкістю ~ 10 °C/c; 850–570 °C – із середньою швидкістю 0,4 °C/c; від 570 °C до кімнатної температури – у спокійному повітрі.

Показано, що реалізація розробленого температурно-швидкісного регламенту постдеформаційного охолодження сприяє зниженню показників міцності та підвищенню пластичності прокату, а також утворенню задовільної кількості поверхневої окалини. Така реакція механічних властивостей металу є наслідком зменшення кількості у феритній матриці бейніту і мартенситу до 5–10 % об. кожного залежно від марки сталі. При цьому зниження у межах марочного складу вмісту вуглецю і марганцю є додатковим фактором, який обумовлює інтенсифікацію та повноту протікання дифузійного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення.

Промислове перероблення дослідних партій бунтового прокату зі сталей Св-08ХГСМФА і Св-08ХГ2СМФ, виготовленого із застосуванням розробленого режиму знеміцнювального термомеханічного оброблення, засвідчило високий рівень технологічної пластичності матеріалу. Це

дозволило виготовити зварювальний дріт з унормованими механічними властивостями методом «прямого» волочіння без проведення операції додаткового пом'якшувального термічного оброблення (рекристалізаційного відпалу) дрітної заготовки на проміжних діаметрах із сумарним обтисненням під час холодного пластичного деформування до 95 %. Реалізація процесу волочіння за таких умов характеризується підвищеною енергоефективністю, екологічною безпечністю, достатнім рівнем продуктивності та стабільно високими показниками якості готового дроту.

З урахуванням конструктивних особливостей наявного устаткування для виготовлення бунтового прокату визначено комплекс рекомендацій щодо адаптування та впровадження розробленої технології знеміцнювального термомеханічного оброблення низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення на діючих металургійних комбінатах України.

Ключові слова: низьковуглецева легована сталь, прокат, термічна обробка, мікроструктура, фазові перетворення, аустеніт, мартенсит, механічні властивості, моделювання, температура, деформація, твердість, волочіння.

ABSTRACT

Oliinyk E. V. Features of the formation of structure and properties of high-deformability wire rod made of low-carbon Cr-Mo-V steels for welding wire production. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

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

The dissertation is devoted to a comprehensive investigation of the regularities governing microstructural evolution and the formation of mechanical properties in low-carbon Cr-Mo-V steel wire rod, as well as to the scientific substantiation and

development of a softening thermomechanical treatment technology for its subsequent energy-efficient production of welding consumables.

The study analyzes current trends and challenges associated with the production of wire rod and wire from low-carbon Cr-Mo-V welding steels. It is demonstrated that one of the most pressing tasks currently facing manufacturers of welding-grade wire rod worldwide is the maximization of metal ductility in the as-supplied condition for hardware plants, while rational microstructural design plays a key role in the production of highly ductile wire rod. The formation of hard constituents (martensite, bainite, or their mixtures) within the steel microstructure is undesirable due to the increased risk of wire fracture during intensive cold drawing operations. At the same time, information concerning the formation of such structures during wire rod production under industrial metallurgical conditions remains extremely limited, whereas several aspects of microstructural evolution and phase formation mechanisms have not yet been sufficiently investigated.

Based on the results of theoretical studies, the fundamental principles of softening thermomechanical treatment of low-carbon steel wire rod within modern continuous production lines have been further developed. The proposed concept is based on creating a specific structural state of hot-deformed austenite prior to its decomposition, characterized by a refined grain size resulting from dynamic recrystallization and a reduced dislocation density with enhanced dislocation ordering due to the subsequent development of static recovery and metadynamic recrystallization, while simultaneously suppressing static recrystallization. This approach constitutes the primary prerequisite for increasing the volume fraction of polygonal ferrite and reducing the likelihood of bainitic and martensitic structure formation during slow cooling from rolling temperatures.

Considering the requirements of current standards and specifications established by leading domestic and international manufacturers of low-carbon alloyed steel wire rod, target quality indicators for the corresponding steel products were determined, taking into account the performance requirements of welding consumables.

The kinetics of austenite decomposition in CrMoV1Si steel (an analogue of Sv-08KhGSMFA welding steel) during continuous cooling over a wide cooling-rate range (116–0.05 °C/s) were investigated, and the corresponding Continuous Cooling Transformation (CCT) diagram was constructed. The principal feature of phase and microstructural transformations in the investigated steel is that under slow cooling conditions within the range of 1.1–0.05 °C/s, a complex diffusional–intermediate–shear transformation mechanism is realized, resulting in the formation of a multiphase microstructure consisting of ferrite, pearlite, bainite, and high-hardness martensite in varying proportions. Moreover, the volume fraction of martensite increases with decreasing cooling rate due to enhanced diffusional enrichment of retained austenite regions with carbon and manganese prior to the onset of the martensitic transformation. Based on metallographic investigations, the obtained data were systematized and presented in the form of a structural diagram.

Using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray microanalysis, and Auger electron spectroscopy, the formation of high-carbon martensite (content $C > 1$ wt.%) possessing high hardness (722–897 HV_{0.02}) was established during slow continuous cooling of low-carbon Cr-Mo-V steel from the austenitic area to room temperature. This martensite forms as relatively uniformly distributed fine spherical regions located predominantly along ferrite grain boundaries and, in some cases, within ferrite grains. Experimental evidence confirmed that such microstructural evolution is governed by the dynamic variation of the chemical composition of individual structural constituents during cooling, primarily due to the diffusional partitioning of carbon, manganese, and silicon between the α and γ phases.

Based on the principles of non-equilibrium thermodynamics, a computational model describing the partitioning of alloying elements during microstructure formation in CrMoV1Si steel under slow cooling conditions was developed. The thermodynamic driving forces for carbon diffusion, kinetic coefficients, and thermodynamic fluxes governing the kinetics of structural evolution during cooling were determined. Analytical expressions were proposed for calculating the

characteristic dimensions of austenitic and martensitic regions formed as a result of carbon, manganese, and silicon diffusion fluxes.

Through the integration of experimental and theoretical findings, a scientifically substantiated mechanism describing the formation of high-carbon martensite regions in low-carbon alloyed steel wire rod during slow continuous cooling from the austenitic region to room temperature was proposed.

The influence of thermomechanical treatment parameters on the microstructure and mechanical properties of CrMoV1Si steel was investigated. The obtained relationships between hardness, yield strength, ultimate tensile strength, and processing conditions made it possible to determine the optimal finishing temperature range for hot deformation of low-carbon Cr-Mo-V steel wire rod (1050–1100 °C) from the standpoint of maximum softening under steady-state cooling conditions.

Based on laboratory simulations, an innovative softening thermomechanical treatment technology for small-diameter (5.5 mm) low-carbon Cr-Mo-V steel welding-grade wire rod was developed and subsequently validated under industrial conditions on a Stelmor cooling line. The technology includes water cooling from the finishing deformation temperature of 1050 °C to 950 °C, followed by differentiated three-stage air cooling at specified rates within different temperature intervals: 950–850 °C at an average cooling rate of 10 °C/s; 850–570 °C at an average cooling rate of 0.4 °C/s; and from 570 °C to room temperature in still air.

It was demonstrated that implementation of the developed temperature–cooling-rate mode promotes a reduction in strength characteristics and an increase in ductility, while simultaneously ensuring the formation of an acceptable amount of surface scale. Such a response of the mechanical properties is attributed to a decrease in the content of bainite and martensite within the ferritic matrix to approximately 5–10 vol.% each, depending on steel grade. Furthermore, reductions in carbon and manganese contents within the specified compositional range act as additional factors enhancing both the intensity and completeness of the diffusional $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation.

Industrial processing of experimental wire rod batches produced from Sv-08KhGSMFA and Sv-08KhG2SMF steels using the developed softening thermomechanical treatment mode demonstrated a high level of technological ductility. This enabled the production of welding wire possessing standardized mechanical properties by means of direct drawing without the need for intermediate softening heat treatment (recrystallization annealing) of the wire at intermediate diameters, while achieving a cumulative cold deformation reduction of up to 95%. Under such conditions, the drawing process is characterized by improved energy efficiency, environmental sustainability, adequate productivity, and consistently high product quality.

Taking into account the design features of existing wire rod production equipment, a set of practical recommendations was developed for the adaptation and implementation of the proposed softening thermomechanical treatment technology for low-carbon Cr-Mo-V welding steels at operating metallurgical plants in Ukraine.

Keywords: low-carbon alloyed steel, rolled products, heat treatment, microstructure, phase transformations, austenite, martensite, mechanical properties, modeling, temperature, deformation, hardness, wire drawing.