

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЗНЕМІЦНЮЮЧОГО
ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ
СТАЛЕВОГО ПРОКАТУ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Олійник Е.В., Парусов Е.В., Чуйко І.М.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Україна

Анотація. *Наведено теоретичне обґрунтування передумов для пластифікації прокату зварювального призначення з легованих сталей за рахунок контрольованого управління процесами структуроутворення при охолодженні металу після гарячого пластичного деформування з прокатного нагріву. Розглянуто конструктивні особливості лінії двостадійного (водо-повітряного) охолодження «Стелмор», необхідної для ефективної реалізації процесу знеміцнюючого термомеханічного оброблення сталевго прокату зварювального призначення.*

Ключові слова: *прокат зварювального призначення, термомеханічне оброблення, лінія двостадійного охолодження «Стелмор», режим охолодження.*

Вступ. Згідно з класичним визначенням термомеханічне оброблення (ТМО) слід розуміти як сукупність операцій деформування, нагрівання й охолодження (у різній послідовності), у результаті яких формування кінцевої структури металу, а отже і його властивостей, відбувається в умовах підвищеної щільності та відповідного розподілу недосконалостей кристалічної будови, що створені пластичним деформуванням [1].

Одним з найбільш розвиненим напрямом використання ТМО є виробництво сталевго прокату різноманітного призначення в потоці безперервних дротяних прокатних станів, суміщених з лініями двостадійного охолодження «Стелмор». При розробці того чи іншого режиму ТМО враховується ряд показників: температура нагрівання заготовок у печі, деформаційний розігрів металу під час прокатування, температура закінчення гарячого деформування, можливості регулювання швидкості післядеформаційного охолодження, а також співвідношення площі поверхні прокату до його об'єму на одиницю довжини (розмірний фактор) [2].

На початкових етапах розвитку технології ТМО при розробленні режимів прагнули досягти найбільших показників міцності сталі та знизити втрату

металу в окалину. При цьому дослідження були сфокусовані на двох основних схемах ТМО: низькотемпературній та високотемпературній, які передбачали гартування сталі після теплого або гарячого деформування аустеніту відповідно. Згодом з'явилися й інші різновиди ТМО прокату, умовно звані квазі-ізотермічними, які дозволили забезпечити формування ферито-перлітної, перлітної або бейнітної структури металу [3].

Зазвичай сталі зварювального призначення є системами із комплексним легуванням, що зумовлює складний структурний стан (наявність фериту, перліту, бейніту і мартенситу у різних співвідношеннях) прокату після охолодження. У зв'язку з безперервною модернізацією волочильного обладнання та вдосконаленням технологічних схем виготовлення зварювального дроту можливість отримання прокату з мінімальною кількістю гартівних структур (мартенситу та бейніту) стає все більш актуальною проблемою, вирішення якої спрямоване на підвищення продуктивності та зниження матеріальних витрат, пов'язаних з проведенням проміжного відпалу переробної заготовки. Ця обставина визначає необхідність розроблення науково обґрунтованої технології знеміцнюючого ТМО прокату з легованих сталей зварювального призначення у сучасних умовах металургійних підприємств, що дозволить забезпечити його подальше енергоефективне перероблення у зварювальний дріт різних профілерозмірів.

Мета роботи – визначити перспективні напрямки пластифікації сталевого прокату зварювального призначення за рахунок контрольованого управління процесами структуроутворення при ТМО.

Матеріал дослідження – сталевий прокат зварювального призначення широкого марочного складу, який піддається в подальшому холодному пластичному деформуванню на металовиробних підприємствах за схемою ресурсозберігаючого прямого волочіння.

Результати дослідження. Одним з найпоширеніших у металургійній практиці є спосіб охолодження сталевого прокату, який має назву «Стелмор-процес», а технологічна ділянка охолодження металу – лінією двостадійного (водо-повітряного) охолодження (рис. 1). У складі такої лінії

прокат після виходу з дротяного блоку охолоджується до певної температури водою у спеціальних форсуночних пристроях, а після розкладання на витки – повітряними потоками, які нагнітаються дуттьовими вентиляторами знизу-вгору на транспортер.

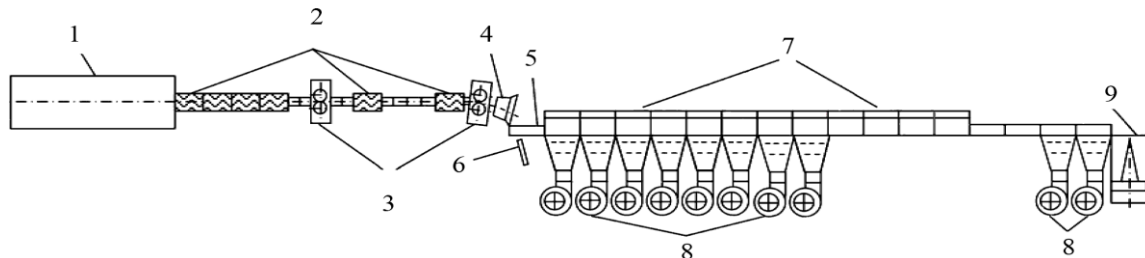


Рисунок 1 – Схема розташування основного обладнання сучасної лінії «Стелмор» [2]
1 – дротяний прокатний блок; 2 – ділянка водяного охолодження; 3 – трайбапарати;
4 – виткоутворювач; 5 – приймальний стіл витків прокату; 6 – пірометр;
7 – ділянка регульованого повітряного охолодження з роликівим транспортером і теплоізоляційними кришками; 8 – дуттьові повітряні вентиляторні системи;
9 – шахта виткозбірника

В залежності від умов проведення гарячого деформування (варіювання температури, ступеня і швидкості деформації, тривалості післядеформаційного витримування) може спостерігатися широкий спектр структурних станів деформованого металу: від гаряченаклепаного до статично рекристалізованого [4]. Ці структурні стани, зафіксовані охолодженням, і визначають комплекс механічних властивостей прокату за кімнатної температури після протікання відповідних фазових перетворень.

На початкових стадіях гарячого деформування завжди відбувається деформаційне зміцнення, пов'язане з підвищенням щільності дислокацій. Відновлювальними (знеміцнюючими) процесами, що зменшують щільність дислокацій під час гарячого деформування, можуть бути динамічний зворот (полігонізація) і динамічна рекристалізація. Після динамічної рекристалізації, особливо коли вона відбувається в умовах накладення один на одного циклів знеміцнення-зміцнення при багатостадійному вальцюванні на прокатному обладнанні, метал містить підвищену щільність дефектів кристалічної будови, що слугує термодинамічним стимулом для відновлювальних процесів після закінчення гарячого деформування. Існують три типи мимовільних

відновлювальних процесів після гарячого деформування: статичний зворот (полігонізація), метадинамічна рекристалізація та статична рекристалізація (рис. 2).

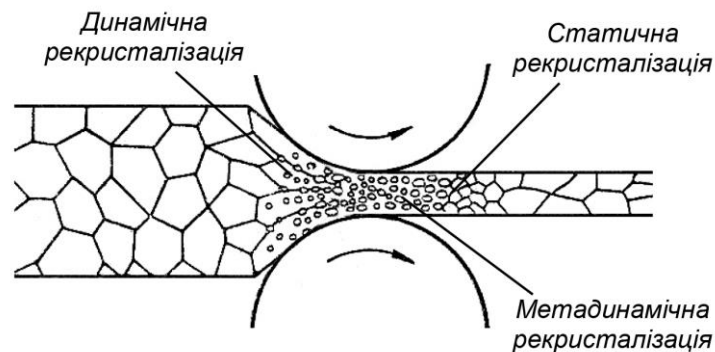


Рисунок 2 – Схема протікання динамічних і статичних відновлювальних процесів при гарячому деформуванні методом прокатування

Якщо динамічно рекристалізований метал після виходу з дротяного прокатного блоку піддавати післядеформаційним витримкам за температури закінчення гарячого деформування, то у ньому можуть протікати процеси статичної полігонізації (надлишкові дислокації будуть перебудовуватися у субграниці), а також метадинамічної та статичної рекристалізації (надлишкова кількість дислокацій буде ліквідована у результаті міграції великокутових границь). Метадинамічна рекристалізація аустеніту відрізняється від статичної тим, що вона протікає без інкубаційного періоду за рахунок «свіжих» ненаклепаних зародків рекристалізованих зерен, сформованих динамічною рекристалізацією, спроможних до зростання у статичних умовах безпосередньо після закінчення гарячого деформування [4]. Статична рекристалізація пов'язана з формуванням нових зародків, здатних до наступного зростання за рахунок матриці гарячедеформованого металу, у якій в тій чи іншій мірі пройшли процеси динамічної та метадинамічної рекристалізації, але зберіглася підвищена щільність дислокацій [5].

Таким чином, саме процеси метадинамічної та статичної рекристалізації, що протікають після динамічної рекристалізації та статичної полігонізації, є визначальними при знеміцнюючих схемах ТМО прокату. Знеміцнюючий ефект при ТМО досягається регулюванням величини динамічно рекристалізованого аустенітного зерна шляхом прискореного водяного охолодження металу від

температури закінчення гарячого деформування (1150–1050 °С) до температури розкладання прокату на витки перед початком стадії повітряного охолодження (950–850 °С). Перетворення дрібнозернистого аустеніту при такій схемі ТМО починається за більш високих температур у порівнянні з крупнозернистим (після протікання у достатній мірі процесів метадинамічної та статичної рекристалізації) і супроводжується утворенням більшої об'ємної частки структурно-вільного фериту, зменшенням твердорозчинного зміцнення за рахунок зниженням концентрації вуглецю у фериті й меншою вірогідності утворення структур бейнітного та мартенситного типу при наступному уповільненому охолодженні на транспортері під теплоізоляційними кришками [6].

Контрольоване управління вказаними процесами структуроутворення при охолодженні металу з прокатного нагріву на лінії Стелмор створює необхідні передумови для вирішення важливої науково-прикладної проблеми – пластифікації сталевого прокату зварювального призначення з легованих сталей.

З метою створення умов ефективного охолодження металу постійно удосконалюються конструкції обладнання лінії «Стелмор». При виробництві прокату з низьковуглецевих легованих, у тому числі й складнолегованих сталей зварювального призначення, потрібен уповільнений режим на стадії повітряного охолодження (збільшення тривалості витримування прокату під теплоізоляційними кришками із середньою швидкістю охолодження не більше 0,3 °С/с) [3], що зумовило створення лінії «довгий Стелмор» (загальною довжиною ділянки водо-повітряного охолодження 100–150 м), яка є більш ефективною і універсальною у порівнянні з лінією «короткий Стелмор» (довжина ділянки 60–70 м).

Ідеологія створення лінії Стелмор довжиною до 150 м з можливістю регульованого управління повітряними потоками при охолодженні металу, яка пропагувалась компанією «Danieli» (Італія), спочатку на практиці не знайшла масового використання, через те, що металургійні підприємства не усвідомили безперечну важливість такого обладнання. Однак у подальшому при

модернізації існуючих виробництв і проектуванні нових цей підхід був переглянутий металургами у всьому світі з наданням переваги лініям «довгий Стелмор», що дозволило реалізовувати більш ширший спектр режимів двостадійного охолодження сталевого прокату різноманітного призначення й ефективно впливати на формування його структури та властивостей.

Висновки. Проаналізовано основні відновлювальні (знеміцнюючі) структурні процеси, що відбуваються як у процесі гарячого деформування аустеніту, так і безпосередньо після його завершення. Показано, що процеси метадинамічної та статичної рекристалізації, які протікають після динамічної рекристалізації та статичної полігонізації, є визначальними при знеміцнюючих схемах ТМО сталевого прокату. Знеміцнюючий ефект при ТМО досягається шляхом регулювання величини динамічно рекристалізованого аустенітного зерна шляхом прискореного водяного охолодження металу від температури закінчення гарячого деформування до температури розкладання прокату на витки перед початком стадії повітряного охолодження на лінії «Стелмор». Теоретично обґрунтовано, що контрольоване управління вказаними процесами структуроутворення при охолодженні металу з прокатного нагріву створює необхідні передумови для пластифікації прокату зварювального призначення з легованих сталей. Розглянуто конструктивні особливості лінії двостадійного охолодження «Стелмор», необхідної для ефективної реалізації процесу знеміцнюючого ТМО сталевого прокату зварювального призначення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Degarmo E. P., Black J. T., Kohser R. A. *Materials and Processes in Manufacturing* (9th ed.). 2003. Wiley. 388 p.
2. Парусов Е. В., Сичков О. Б., Губенко С. І., Малашкін С. О., Сагура Л. В. Про ефективні шляхи вдосконалення режимів регульованого повітряного охолодження бунтового прокату в промислових умовах. *Наукові праці ВНТУ*. 2017. № 3. С. 1–9.
3. Parusov V. V., Parusov O. V., Chuyko I. N., Sychkov A. B. *Scientific and technological aspects of high-grade rolled wire production. Metallurgical and Mining Industry*. 2010. Vol. 2. No. 2. P. 137–142.
4. Raabe D. *Recovery and Recrystallization: Phenomena, Physics, Models, Simulation. Physical Metallurgy* (5th ed.). 2014. P. 2291–2397. DOI: 10.1016/B978-0-444-53770-6.00023-X.

5. Montheillet F., Lépinoux J., Weygand D., Rauch E. Dynamic and Static Recrystallization. *Advanced Engineering Materials*. 2001. Vol. 3. Iss. 8. P. 587–589. DOI: 10.1002/1527-2648(200108)3:8<587::AID-ADEM587>3.0.CO;2-V
6. Parusov V. V., Chuyko I. N., Parusov O. V., Sychkov A. B., Suhomlin V. I. Scientific and technological aspects of production wire rod enhanceable ability for deformation from steels of Sv-08GNM and Sv-08G1NMA grades. *Metallurgical and Mining Industry*. 2013. No. 6. P. 61–64.

THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF SOFTENING THERMOMECHANICAL TREATMENT OF WELDING WIRE ROD

Eduard Oliinyk, Eduard Parusov, Ihor Chuiko

Abstract. *The theoretical justification of the prerequisites for the plasticization of welding wire rod from alloy steels due to the management of the processes of structure formation during cooling of the metal after hot plastic deformation is given. It is shown that the processes of metadynamic and static recrystallization of austenite, which occur after dynamic recrystallization and static polygonization, are decisive in the softening schemes of thermomechanical treatment of wire rod. The softening effect during thermomechanical treatment is achieved by adjusting the size of the dynamically recrystallized austenite grain through accelerated water cooling of the metal from the temperature of finish hot deformation to the temperature of the folding out of the wire rod into coils before the start of the air-cooling stage on the "Stelmor" line. The transformation of fine-grained austenite begins at higher temperatures compared to coarse-grained and is accompanied by the formation of a larger fraction of structurally free ferrite and a decrease in the fraction of bainite and martensite during the subsequent slow cooling on the conveyor under heat-insulating covers. The structural features of the "Stelmor" line, necessary for the effective implementation of the process of softening thermomechanical treatment of welding wire rod, are considered.*

Keywords: *welding wire rod, thermomechanical treatment, two-stage cooling line "Stelmor", cooling mode.*

REFERENCE

1. Degarmo E. P., Black J. T., Kohser R. A. *Materials and Processes in Manufacturing* (9th ed.). 2003. Wiley. 388 p.
2. Parusov E. V., Sychkov O. B., Gubenko S. I., Malashkin S. O., Sahura L. V. About effective ways of improving the modes of regulated air cooling of wire rod in industrial conditions. *Scientific works of VNTU*. 2017. No. 3. P. 1–9.
3. Parusov V. V., Parusov O. V., Chuyko I. N., Sychkov A. B. Scientific and technological aspects of high-grade rolled wire production. *Metallurgical and Mining Industry*. 2010. Vol. 2. No. 2. P. 137–142.

4. Raabe D. Recovery and Recrystallization: Phenomena, Physics, Models, Simulation. Physical Metallurgy (5th ed.). 2014. P. 2291–2397. DOI: 10.1016/B978-0-444-53770-6.00023-X.
5. Montheillet F., Lépinoux J., Weygand D., Rauch E. Dynamic and Static Recrystallization. Advanced Engineering Materials. 2001. Vol. 3. Iss. 8. P. 587–589. DOI: 10.1002/1527-2648(200108)3:8<587::AID-ADEM587>3.0.CO;2-V
6. Parusov V. V., Chuyko I. N., Parusov O. V., Sychkov A. B., Suhomlin V. I. Scientific and technological aspects of production wire rod enhanceable ability for deformation from steels of Sv-08GNM and Sv-08G1NMA grades. Metallurgical and Mining Industry. 2013. No. 6. P. 61–64.