

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет гірничо-металургійний
Кафедра металургії, матеріалознавства та організації виробництва

АВТОРЕФЕРАТ кваліфікаційної роботи

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Інноваційна діяльність у матеріалознавстві»
за спеціальністю 132 Матеріалознавство

**на тему «Вдосконалення режимів обробки виробів
з середньовуглецевих низьколегованих сталей з метою
підвищення механічних характеристик»**

Здобувач

Альона ТЕРЕЩЕНКО

Кам'янське, 2024

Кваліфікаційною магістерською роботою є рукопис.

Робота виконана у Технічному університеті «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» на кафедрі металургії, матеріалознавства та організації виробництва.

Керівник:



Пашинський, Володимир, Вікторович,
доктор технічних наук, професор,
завідуючий кафедри Металургії,
матеріалознавства та організації
виробництва

Захист відбудеться 24 січня 2024 р. о 09:00 год на засіданні
екзаменаційної комісії (<http://surl.li/pmioo>).

Електронна версія автореферату розміщена в Інституційному
репозиторії ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ
ПОЛІТЕХНІКА» 16 січня 2024 р.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Для успішної конкурентоспроможності на міжнародному ринку та на ринку України металургійним підприємствам, незважаючи на всі технологічні та соціально-економічні труднощі, необхідно постійно поповнювати перелік своєї продукції, що відповідає високим нормам міжнародних та європейських стандартів.

У 2022 році комбінат ПАТ «Запоріжсталь» почав освоювати виробництво конструкційної низьколегованої боровмісної сталі марки 30MnB5 для відпуску та загартування, призначеної для виготовлення виробів та деталей, що після термічної обробки мають високу міцність, зносостійкість та опір високим механічним та ударним навантаженням. Для таких виробів і конструкцій дуже важливо мати комплекс структури та технологічних властивостей, в якому одночасно досягається високий рівень міцності, пластичності та високого опору до ударних навантажень.

В даній роботі показано процес супроводу освоєння технології виробництва сталі 30MnB5, а також дослідження та підбір експериментальних режимів термічної обробки цієї сталі, які б покращили механічні властивості гарячекатаного прокату.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 88 сторінок, робота містить 16 рисунків, 25 таблиць. Список використаних джерел складається з 36 джерел.

ОСНОВНА ЧАСТИНА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

З літературних джерел відомо, що зносостійкі сталі – це сталі з особливими властивостями, що здатні чинити підвищений опір зношуванню. Найвідоміші зносостійкі сталі у світі – це сталі Хардокс виробництва шведського металургійного концерну SSAB, Основними критеріями, що визначили їх популярність, є високі показники механічних характеристик у порівнянні з іншими сталями. Насамперед, це твердість, міцність, стабільність геометричних та фізичних властивостей. Завдяки мінімальній кількості хімічних домішок у сталі всіх марок цього виробника вони вважаються еталоном за своїми характеристиками, а саме, вони вирізняються високими показниками зносостійкості, міцності, стійкості до ударного впливу і до навантажень вібраційного типу, містять високий відсоток легуючих домішок. Виробляються ці сталі шляхом гарячої прокатки, для підвищення характеристик міцності метал піддається обробці загартовуванням і відпуску. Сталь досить в'язка, щоб не тріскатися. Виняткова ударна в'язкість дозволяє виробам із сталі Хардокс витримувати вібрацію, удари, тертя, поштовхи та інші навантаження. Вони легко піддаються будь-якій механічній обробці – згинанню, формуванню, зварюванню, проявляючи стійкість до появи та поширення тріщин. В агресивних середовищах, де непередбачувані

поломки можуть не тільки завдати істотних матеріальних збитків, але й поставити під загрозу збереження майна та безпеку людей, застосування листового прокату Хардокс зводить всі ці ризики до мінімуму, оберігаючи обладнання від виходу з ладу. Принципова відмінність листового прокату із сталі Хардокс від звичайної, навіть зносостійкої сталі, – у високій ударній в'язкості. Саме тому ця сталь може використовуватися також у металоконструкціях. Вона досить легко піддається деформаціям, не втрачаючи унікальних властивостей. Поряд з високою межею плинності, ця особливість дозволяє виготовляти зі сталі Хардокс вироби, в яких суттєво знижено власну вагу, що зрештою підвищує їхню конкурентоспроможність, даючи можливість збільшити корисне навантаження. Завдяки високій стійкості до абразивного зносу, сталі Хардокс використовується для виготовлення:

- самоскидних і причіпних кузовів вантажівок, які використовуються для перевезення гірських порід, сільськогосподарської продукції, будівельного сміття та інших матеріалів з підвищеною абразивністю;

- кузовів сміттєвозів, які постійно піддаються не тільки механічним, а й хімічним навантаженням;

- ковшів екскаваторів, лопат бульдозерів і навісного обладнання тракторів, схильного до особливо сильного зносу;

- контейнерів різного призначення, зокрема й для перевезення агресивних речовин;

- конструкцій, які мають бути міцними і водночас легкими.

Боровмісна сталь – це сплав заліза з вуглецем та іншими елементами, в який в якості легуючої добавки введений бор. У невеликих кількостях він позитивно впливає на формування мікроструктури сталі і робить метал міцним. Сталі з бором використовуються для виготовлення деталей аграрних і промислових машин: ножів грейдера, гусеничних ланцюгів, дробильних установок, ножів та різальних полотен, плугів, дисків для борони та інших. Щоб машини довше працювали без поломок, такі деталі повинні мати високу міцність, стійкість до ударів і зносостійкість.

Першопродцем у виробництві легованих бором марок сталей для компанії Метінвест стала марка 30MnB5. Це конструкційна низьколегована боровмісна сталь для відпуску та загартування, призначена для виготовлення виробів і різноманітних деталей, які після термообробки мають високу міцність, зносостійкість та опір великим механічним навантаженням. Виробництво сталі марки 30MnB5 регламентується європейським (EN 10083-3) та міжнародним стандартом (BS EN ISO 683-2). В Україні гарячекатаний прокат, легований бором, в тому числі і сталь марки 30MnB5, виробляється за аналогічним стандартом – ДСТУ EN 10083-3.

Згідно з проведеним аналізом за темою у вітчизняній та зарубіжній металургії мікролегування (модифікування) бором використовується у виробництві спеціальних сталей (для підвищення їхніх технологічних і

службових характеристик), у виробництві вуглецевої сталі (для підвищення прогартуємості без застосування дорогих мікролегованих елементів); у виробництві низьколегованих конструкційних сталей із метою економії дорожчих легованих елементів (Mo, Ni, Cr) без погіршення механічних і службових властивостей. Особливий інтерес викликає вплив бору на структуру низьковуглецевих сталей із вмістом вуглецю 0,02-0,03 %, у яких завдяки додаванню бору вдалося отримати структуру нижнього бейніту. Використання бору дає змогу підвищити прогартуємість металу, знизити ефект старіння і підвищити жароміцність сталі (за рахунок зміцнення границь зерен нітридами бору). При виплавці мало- і середньовуглецевої сталі особливістю боровмісних сталей є їх висока пластичність, а також сприятливе співвідношення пластичних і міцнісних властивостей. Застосування бору, поряд з іншими мікролегуєчими елементами, відкриває широкі можливості для отримання низьколегованих сталей, експлуатаційні характеристики яких у багатьох випадках не тільки не поступаються, а й перевершують рівень властивостей сталей, отриманих із застосуванням традиційної системи легування. Для більшості легуєчих елементів позитивний вплив на властивості сталі пропорційний кількості добавки, що вводиться. Бор же істотно підвищує якість металу вже при введенні його у кількості 0,001-0,01 %. При такому вмісті вплив бору на прогартуємість та в'язкість низько- і середньолегованих сталей відповідає ефекту легування хромом, марганцем, молібденом або нікелем із вмістом їх у 100-300 разів більшим за домішки бору. У деяких літературних джерелах повідомляється, що вплив 0,001-0,0025 % бору еквівалентна впливу $1,33 [\text{Ni}] + 0,31[\text{Cr}] + 0,4 [\text{Ni}]$, а вплив 0,002 % бору на прогартуємість сталей рівнозначна впливу $1,5 [\text{Ni}]$. Висока активність бору щодо кисню й азоту дає змогу використовувати його в нестаріючих і корозійностійких сталях. Вміст бору у них становить 0,002-0,005 %. Найважливішими передумовами застосування бору є його дешевизна, доступність, екологічна безпека і, головне, вкрай малий необхідний вміст у сталі. Рекомендований вміст бору в металі перебуває в межах 0,0005-0,005 %.

Після опрацювання літературних джерел зрозуміло, що для виробів, які працюють з ударними навантаженнями, дуже важливо сформувати такий комплекс механічних характеристик, у якому одночасно досягається високий рівень міцності, відносного подовження та ударної в'язкості. Зазвичай, такий комплекс формують шляхом гартування з аустенітного стану с наступним відпуском. Температура та тривалість відпуску підбираються експериментально, спираючись на результати механічних випробувань. Тож, у даній роботі подальший пошук шляхів покращення комплексу властивостей досліджуваного матеріалу спирався на наступні припущення. Потенційно підвищити пластичність мартенситних структур після гартування можливо за рахунок:

1. Підвищення вмісту залишкового аустеніту в структурі після гартування за рахунок підвищення температури нагріву під гартування. Досліджувана сталь містить підвищену концентрацію марганцю, що робить аустеніт більш стабільним, але одночасно, марганець сприяє зростанню аустенітного зерна, що може знизити ударну в'язкість

2. Формування дуальної ферито-мартенситної структури за рахунок неповного гартування з температур нижче A_{c3} . Присутність доевтектоїдного фериту у структурі після гартування може підвищити ударну в'язкість, але одночасно знижує міцнісні характеристики.

Отже, завдання – перевірка вищезазначених гіпотез, а саме:

- встановлення залежності характеристик міцності та пластичності сталі 30MnB5 від режимів термічної обробки;
- визначення ефективності термічної обробки в залежності від товщину прокату;
- дослідження зміни структури сталі в ході експериментальних режимів її обробки;
- обґрунтування режиму гартування сталі, який зможе забезпечити необхідний комплекс характеристик міцності, пластичності та високого опору до ударних навантажень.

На підставі проведеного аналізу літературних джерел було визначено режими термічної обробки та сплановано проведення експериментів для сталі марки 30MnB5. На зразках гарячекатаного прокату зі сталі марки 30MnB5 товщиною 3,0 мм, 5,0 мм, 7,0 мм та 8,0 мм виробництва ПАТ «Запоріжсталь» проведено декілька комплексів випробувань, що включали в себе: механічні випробування на розтяг; випробувань на ударну в'язкість; випробувань на твердість; дослідження мікроструктури, термічну обробку дослідних зразків.

Отримані результати дозволяють рекомендувати для виробництва сталі марки 30MnB5 перспективний режим термічної обробки для забезпечення її міцності та пластичності, а саме конкретно визначений режим термічної обробки в залежності від потреб замовника: якщо для виготовлення металевих виробів чи конструкцій до прокатної продукції висуваються вимоги максимальної міцності та легкості, то в такому випадку для виробництва сталі 30MnB5 раціонально використати листовий прокат менший за товщиною, оскільки після загартування він виявляється за ефективністю рівним більш товстому металопрокату. Якщо ж є потреба в поєднанні міцності та пластичності продукції зі сталі даної марки, тоді необхідно застосовувати інший варіант термічної обробки – низькотемпературне загартування в двофазному інтервалі температур з обов'язковим відпуском для формування ферито-мартенситної структури. В такому разі механічні властивості прокату зі сталі 30MnB5 будуть зростати пропорційно до його товщини.

Враховуючи той факт, що гарячекатаний лист зі сталі 30MnB5 товщиною 7,0 мм при даній технології виробництва обраному режиму термічної обробки витримує більше питоме навантаження, ніж прокат

товщиною 8,0 мм, то раціональним буде при замовленні на високоміцну продукцію виготовляти лист 7,0 мм, тим самим зекономивши на багатьох витратах для його виробництва.

ВИСНОВКИ

На підставі проведеного літературного огляду за темою роботи встановлено, що низьколегована боровмісна сталь марки 30MnB5, яка є відносно недорогим та доступним зносостійким матеріалом, може бути використана для виготовлення виробів, стосовно яких висуваються підвищені вимоги до опору ударним навантаженням.

Проаналізувавши літературні джерела було обрано два експериментальних шляхи підвищення ударної в'язкості сталі 30MnB5 при термічній обробці:

- по-перше, це загартування при високій температурі з метою отримання великої кількості залишкового аустеніту, що сприяє збільшенню ударної в'язкості;

- по-друге, це загартування в міжкритичному інтервалі температур з подальшим відпуском, щоб отримати ферито-мартенситну складову, хоча ферит і менш міцний, проте він також підвищує ударну в'язкість.

При першому експериментальному варіанті термічної обробки було проведено високотемпературне загартування дослідних зразків сталі 30MnB5. В результаті експерименту на зразках товщиною 7,0-8,0 мм отримали досить високі показники міцності та твердості сталі: твердість 48-52 HRC, межа міцності – 970-1412 МПа, (за вимогами ДСТУ межа міцності 950-1150 МПа), проте пластичність матеріалу виявилася мінімальною – відносне подовження склало лише 1-2 %. Було також помічено цікаву закономірність: при випробуванні на розтяг дослідні зразки товщиною 7,0 мм витримували більше питоме навантаження, ніж зразки товщиною 8,0 мм. Це явище спостерігалось і при випробуванні зразків на ударну в'язкість. Після проведення подальшого відпуску метал став більш пластичним, кращі результати були отримані такі: твердість 30-35 HRC, умовна межа плинності становила 794-1050 МПа (за ДСТУ – не менше 800 МПа), межа міцності – 853-1098 МПа, відносне подовження 5-10 %.

Кращий результат випробування на ударну в'язкість сталі 30MnB5 після відпуску становив 3,0-4,5 кгс*м/см².

Другий експериментальний варіант термічної обробки сталі 30MnB5 – це низькотемпературне загартування з подальшим відпуском. В результаті на дослідних зразках товщиною 5,0-8,0 мм отримали межу міцності 1245-1795 МПа, твердість сталі та відносне подовження приблизно на тому ж рівні – 45-52 HRC та 1-2 % відповідно. Відпуск дав наступні показники: твердість 24-30 HRC, умовна межа плинності становила 647-862 МПа (за ДСТУ – не менше 800 МПа), межа міцності –

696-951 МПа, відносно подовження від 9 до 12,5 % (згідно ДСТУ має бути 13 %).

Результати дослідження мікроструктури, механічних властивостей та ударної в'язкості сталі 30MnB5 показали, що з точки зору поєднання міцності та пластичності матеріалу ефективнішим є режим проведення термічної обробки, що полягає в загартуванні з двофазного інтервалу температур, тобто в низькотемпературному загартуванні з подальшим відпуском.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Pashynskiy V.V., Tereshchenko A.G, Development of production technology in order to obtain required mechanical characteristics due to the formation of an improved complex of structure and properties of 30MnB5 steel produced by PJSC «Zaporizhstal. International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 1.p. 109–112.

АНОТАЦІЯ

Терещенко Альона Григорівна. Вдосконалення режимів обробки виробів з середньовуглецевих низьколегованих сталей з метою підвищення механічних характеристик.

Об'єкт і предмет дослідження: Об'єкт дослідження – вплив режиму термічної обробки на структуру та механічні властивості сталі 30MnB5, предмет дослідження – низьколегована боровмісна сталь марки 30MnB5 виробництва ПАТ «Запоріжсталь».

Мета і завдання роботи: Дослідження та встановлення можливості отримання поліпшених механічних та технологічних властивостей сталі марки 30MnB5 шляхом розробки режимів термічної обробки в лабораторних умовах ПАТ “Запоріжсталь”.

Методи дослідження: Проведення аналізу даних, механічні випробування на розтяг, випробування на ударну в'язкість, випробування на твердість, проведення загартування та відпуску металу, визначення мікроструктури гарячекатаного прокату.

Результати дослідження: Практично досліджено та обрано режими термічної обробки для сталі марки 30MnB5 для формування необхідного поліпшеного комплексу її структури та властивостей.

Область застосування: Виробництво гарячекатаного прокату в умовах ПАТ «Запоріжсталь» з призначенням для виготовлення високоміцних та зносостійких деталей і конструкцій, що працюють під великими ударними навантаженнями.

Ключові слова: зносостійкість, міцність, 30MnB5, висока твердість, термічна обробка, EN10083, мартенсит, мікроструктура, аустеніт, ударні навантаження, стійкість до абразивного зносу.

ABSTRACT

Tereshchenko Alyona. Improvement of processing modes of products from medium-carbon low-alloy steels in order to improve mechanical characteristics.

Object and subject of research: The object of the study is the effect of the heat treatment regime on the structure and mechanical properties of 30MnB5 steel, the subject of the study is low-alloy boron steel grade 30MnB5 produced by PJSC "Zaporizhstal".

Purpose and objectives: To study and establish the possibility of obtaining improved mechanical and technological properties of steel grade 30MnB5 by developing heat treatment regimes in the laboratory conditions of PJSC "Zaporizhstal".

Research methods: Data analysis, mechanical tensile tests, impact strength tests, hardness tests, quenching and tempering of metal, determination of the microstructure of hot-rolled steel.

Research results: The heat treatment modes for 30MnB5 steel grade have been practically investigated and selected to form the required improved complex of its structure and properties.

Scope of application: Production of hot-rolled steel in the conditions of PJSC "Zaporizhstal" for the manufacture of high-strength and wear-resistant parts and structures operating under high shock loads.

Keywords: wear resistance, strength, 30MnB5, high hardness, heat treatment, EN10083, martensite, microstructure, austenite, impact loads, abrasive wear resistance.