

© В.І. Козечко¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ЗВАРНИХ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРУ ТА СПОСІБ ЇХ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

© V. Kozechko¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

PECULIARITIES OF MANUFACTURE OF LARGE DIAMETER WELDING PIPES AND METHOD OF THEIR HEAT TREATMENT

Мета. Метою роботи є оцінка можливостей виготовлення труб великого діаметру для магістральних трубопроводів, аналіз вимог до трубноної заготовки з точки зору хімічного складу та механічних властивостей, а також перспективи використання термічної обробки для поліпшення механічних та експлуатаційних властивостей магістральних трубопроводів. Наведено огляд вимог до листового прокату, для виготовлення труб великого діаметру, а також особливості термічної обробки для зняття остаточних напружень. Розглянуто особливості термічної обробки зварного шву та вплив температури на механічні властивості та структуру як основного металу так і зони зварювання.

Методика. Методологічна основа дослідження включала аналіз, порівняння та систематизацію. Для досягнення мети дослідження і вирішення поставлених завдань використовувалася сукупність сучасних методів дослідження та наробки світових виробників. Для труб великого діаметру краще застосовувати періодичний спосіб індукційної термічної обробки, що забезпечить гнучкість при реалізації режимів термічної обробки

Результати. Систематизовані вимоги до якості та хімічного складу матеріалів для трубних заготовок. В результаті встановлено, що можна рекомендувати зміну хімічного складу, контроль параметрів термомеханічної прокатки і технології прискореного охолодження в результаті яких можна отримати бейнітну структуру, що підвищить механічні та експлуатаційні характеристики магістральних трубопроводів. При відпрацюванні технології нагрівання зварних з'єднань необхідно здійснювати температурний контроль у всіх найбільш відповідальних зонах зварного з'єднання.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає в розробці рекомендацій та систематизації існуючих методів та технологій виготовлення труб для магістральних трубопроводів.

Практична значимість. В роботі розглянуті основні вимоги до магістральних трубопроводів. Систематизовані вимоги до прокату для виготовлення труб, особливості термічної обробки та її вплив на структуру та механічні властивості основного металу та зварного шву. Показано основні методи термічної обробки та їх вплив на властивості труб великого діаметру.

Ключові слова: магістральні трубопроводи, термічна обробка, зварний шов, труби великого діаметру, нормалізація.

Вступ. До зварних труб великого діаметру, що використовуються для виготовлення нафто та газових магістральних трубопроводах висуваються особливо жорсткі вимоги до якості, тому що вони експлуатуються під високим тиском рідких середовищ.

До механічних властивостей стінок труб та зварних стиків пред'являються завищені вимоги. На сьогодні, для виготовлення труб великого діаметру широко застосовується листові сталі з підвищеною механічною міцністю.

Процес зварювання внутрішнього робочого шва може відбуватися різними способами, але рекомендовано з використанням керамічного флюсу, завдяки якому можна досягти невеликої ширини зварного шва (до 100 мм). Використання такого флюсу забезпечує високу ударно в'язкість по всьому металу зварного шва.

Високий рівень характеристик в'язкості та міцності забезпечується об'ємною термічною обробкою, завдяки якій вирівнюються механічні властивості основного металу, зварного шва та зони зварювання.

Основна частина. Відносно до магістральних трубопроводів для нафто- та газотранспортування бажання збільшити продуктивність перекачки по трубопроводам (при обмеженому максимальному діаметрі труб: 1220 мм для нафтопроводів та 1420 мм для газопроводів) приводить до збільшення номінального робочого тиску від 5,4 - 7,4 МПа до 9,8 – 14,0 МПа. При таких великих значеннях тиску використання листового прокату трубних сталей попередніх класів міцності привело б до збільшення товщини стінки труб до 35-40 мм, а як слідство – збільшенню металоємності конструкції.

Збільшення товщини стінки труби ускладнює досягнення всіх вимог, що пред'являються до листового прокату. Крім цього при товщині стінки труби більше 40 мм виникають труднощі технологічного характеру, пов'язані як з формуванням труби та її експандуванням, з виконанням поздовжнього шва через обмеження потужності трубозварювальних станів [1]. Різниця в властивостях міцності між листами товщиною 10 і 40 мм, вироблених за технологією контрольованої прокатки, може досягати більше 150 Н/мм [2].

Щоб досягти вище зазначені вимоги, на сьогодні, рекомендовано, та широко впроваджується використання більш дрібної ферито-бейнітної структури. В цьому випадку феритне зерно з середнім розміром ≈ 5 мкм заміняться бейнітним зерном з розміром ≈ 1 мкм. Для того щоб отримати сталі з ферито-бейнітною або з бейнітною структурою повинні бути виконані наступні умови:

- зниження вмісту вуглецю до 0,13-0,07%;
- використання легуючих елементів, що знижують температуру перетворення $\gamma \rightarrow \alpha$ та загальмовують перлітну реакцію (Mn, Mo, Ni, Cr);
- мікролегування Nb та V;
- зниження вмісту шкідливих домішок та газів ($S \geq 0,002\%$; $N \leq 0,006\%$; $P \leq 0,010\%$);
- мікролегування Ti у співвідношенні з азотом $Ti \geq 3.4N$;
- використання прискореного охолодження після контрольованої прокатки.

На сьогодні розроблені типові схеми легування для отримання ферито-бейнітної сталі з прискореним охолодженням [3]:

C(0,06–0,07) – Mn(1,65) – Mo(0,25) – Nb(0,05) – V(0,08);

C(0,06–0,07) – Mn(1,80) – Mo(0,25) – Ni(0,25) – Nb(0,05) – V(0,05);

C(0,06–0,07) – Mn(1,80) – Mo(0,25) – Ni(0,25) – Cu(0,25) – Nb(0,05);

C(0,07–0,08) – Mn(1,70) – Mo(0,15) – Ni(0,20) – Cu(0,20) – Cr(0,20) – Nb(0,05);
 C(0,03–0,07) – Mn(1,50 –1,80) – Ni(0,20) – Cu(0,30) – Cr(0,30) – Nb(0,05–0,10);
 C(0,06–0,09) – Mn(1,70) – Ni(0,25) – Cr(0,30) – Nb(0,10).

Значно низький вміст вуглецю покращує зварюваність, підвищує ударну в'язкість, як основного металу так і зварного шва. Але при виборі вмісту вуглецю необхідно враховувати його вплив на інші показники властивостей сталі. Низький вміст вуглецю сприяє підвищенню хладостійкості, але знижує характеристики міцності (σ_t , σ_b). В діапазоні температур 600-5000С при зниженні вмісту вуглецю від 0,08 до 0,05% значно змінюються показники міцності. При зниженні межі плинності до 20 Н/мм² тимчасовий опір знижується на 30 Н/мм². В результаті підвищується ступінь зміцнення майже на 0,2%. Цей показник може вивести прокат за межі стандарту [3].

Основними видами термічної обробки є відпал, нормалізація, загартування та відпустка. За останні роки все вищі вимоги пред'являються до термічної обробки зварних труб великого діаметру. Це пов'язано, перш за все, вимогами до якості труб та світовими стандартами.

Сучасна термічна обробка чітко регламентує режими нагрівання, витримки та контролює процеси охолодження (рис. 1).

Зварний шов відрізняється від основного металу труби литою структурою, що характеризується низьким механічних властивостями та вірогідністю наявності дефектів. В зоні переходу зварного шву до основного металу є зона термічного впливу, що також відрізняється за структурою від зварного шву та основного металу. Саме ця зона є зоною концентрації напружень.

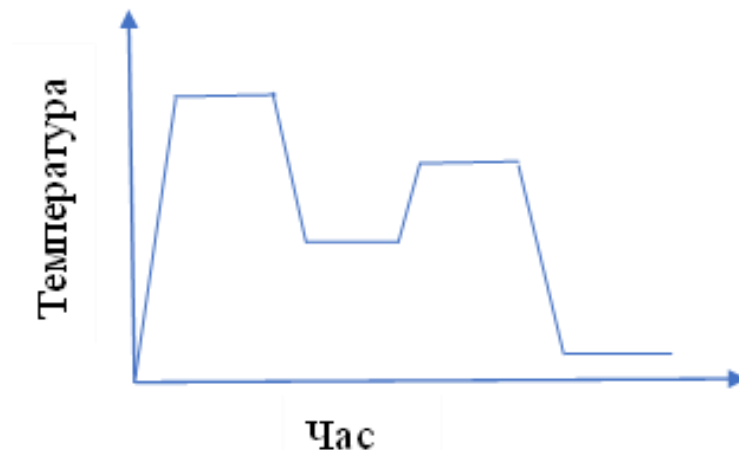


Рис. 1 Типова форма температурного режиму термічної обробки

На рис. 2 схематично зображена структура та зміни термічного циклу зварювання. При зварюванні основний метал, що дотичний до зварного шву піддається нагріву до температури 1500⁰С. Область основного металу нагрівається від 450 до 1500⁰. Саме ця зона і називається зоною термічного впливу.

Не дивлячись на успіхи, які на сьогодні досягнуті в технологіях зварювання, не вдається повністю уникнути утворювання основних дефектів. Для запобігання або зменшення проявів цих дефектів рекомендується термічна обробка.

Використання традиційних способів термічної обробки має свої недоліки та особливості. При цих способах термічної обробки тепло розповсюджується від джерела нагрівання до поверхні стінки труби за рахунок теплопровідності – всередину стінки [4, 5].

Ширина зони нагрівання при цьому досить велика, що призводить до розміцнення металу шва. Для досягнення рівномірного розподілення температурного поля по товщині зварного шва потрібно значно більше часу.

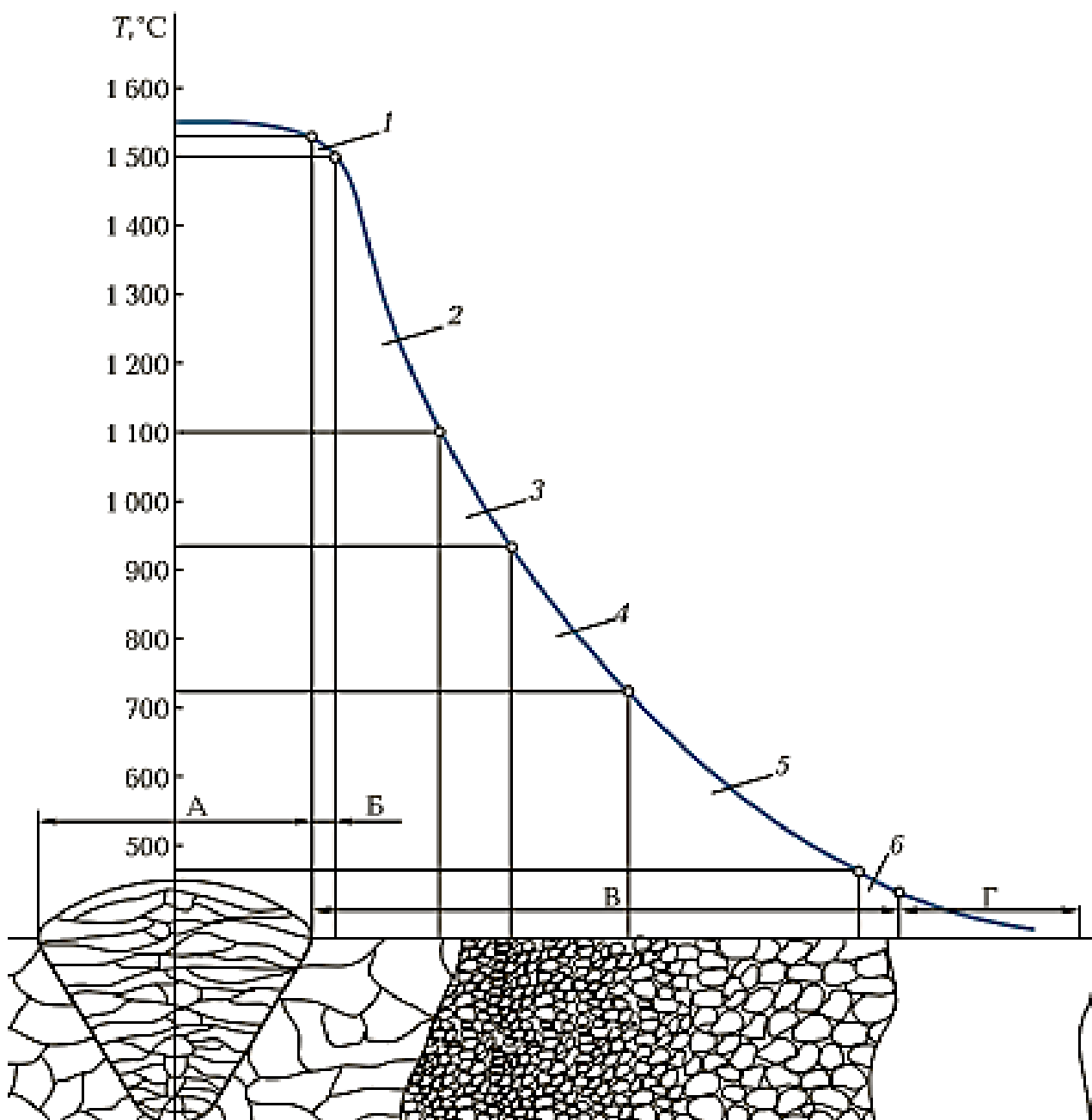


Рис. 2. Термічний цикл зварювання: А – зона наплавленого металу, Б – зона плавлення, В – зона термічного впливу, Г – зона основного металу, 1 – не повне розплавлення, 2 – перегрів, 3 – нормалізація, 4 – не повна перекристалізація, 5 – рекристалізація, 6 – синьоломкість

Для зварних труб невеликого діаметру велике розповсюдження получила індукційна установка безперервної дії, коли легко можна реалізувати режим «нагрів-охолодження» шляхом безпосереднього розміщення зони що охолоджує за індуктором.

Однак для труб великого діаметру така компоновка обладнання і режими нагрівання досить складні і потребують великих потужностей нагрівання для рівномірного розподілення зон нагрівання. В цьому випадку краще застосовувати періодичний спосіб індукційної термічної обробки діномірних труб, що забезпечить гнбкість при реалізації режимів термічної обробки [6, 7].

В умовах локальної термічної обробки зварних виробів першорядне значення набуває ширина зони нагріву. Як відомо, розподіл температури за глибиною зони, що нагрівається ззовні, носить чітко трапецієподібний характер, причому кут нахилу бічних сторін цієї трапеції дуже гострий (~45 °). Це свідчить про те, що при досить вузькій зоні зовнішнього нагріву внутрішні шари зварного з'єднання виявляються недогрітими і все зварне з'єднання бракується.

Помітний вплив на характер розподілу температур по перерізу зони, що нагрівається надає зазор між поверхнею зварного виробу, що нагрівається та індуктором. При дуговому зварюванні зовнішній шов має посилення, величина якого залежить від товщини стінки труби і режиму зварювання, отже, цей фактор потрібно враховувати при виборі зазору між індуктором та виробом. Чим менший зазор, тим менша трапецієвидність температурного поля по перерізу зварного з'єднання. Однак у виробничих умовах надзвичайно складно виставити та підтримувати малі зазори, фактично зазори складають більш ніж 15–20 мм.

У стаціонарних умовах локального нагріву, коли забезпечується якісний захист зони, що нагрівається від навколишнього середовища (температура по краях зовнішньої стінки захисного кожуха становить не більше 0,10-0,15 від температури локального нагріву), в навколишньому установці просторі відсутні відчутні теплові потоки, а в зоні, що поперечно нагрівається, немає тепловідведення, ширина зони нагрівання $l_{c.n}$ може бути в 3-4 рази більше за товщину зварного виробу δ_i :

$$l_{c.n} = (3 - 4)\delta_i$$

Коли об'єкт нагрівання рухається (це відбувається частіше, ніж переміщення нагрівача по об'єкту), ширина зони локального нагріву може бути в 6–8 разів більшою за товщину виробу, тобто бути вдвічі більшою, ніж у попередньому випадку:

$$l_{d.n} = (6 - 8)\delta_i$$

Не менш важливим технологічним параметром є час нагрівання до заданої температури, що визначається з урахуванням допустимого (необхідного та достатнього) температурного градієнта перерізу зварного з'єднання. Ретельно призначаючи ширину зони нагрівання, ми певною мірою проводимо підготовку для вибору оптимального градієнта температури перерізу виробу. Тому при визна-

ченні часу нагрівання потрібно використовувати подані вище рекомендації. Незалежно від виду термічної обробки (високої відпустки, нормалізації, аустенізації) бажано створити мінімальний перепад температур ΔT по перерізу зварного виробу на момент закінчення нагрівання для забезпечення найбільш сприятливого структурного та фізичного стану металу у всьому нагріваному обсязі. Виробнича практика показує, що досягається при $\Delta T = 20\text{--}40\text{ }^\circ\text{C}$ (якщо товщина виробу дуже велика, $\Delta T = 50\text{ }^\circ\text{C}$).

З металознавства відомо, що для досить повного протікання в зварних з'єднаннях дифузійних та фазових процесів, що забезпечують усунення або суттєве перерозподілення дефектів, отриманих при зварюванні необхідно нагрівати їх з дуже малими швидкостями, які порівняно незначно залежать від температури нагрівання і товщини стінки виробу [8].

Так, наприклад, зварні вироби з маловуглецевих сталей (типу Ст10, Ст20, 16С, 17ГС та ін.) необхідно нагрівати під термічну обробку із середніми швидкостями не перевищують $0,5\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, якщо вироби виконані із середньовуглецевих, легованих та малолегованих сталей — із середніми швидкостями не більше $0,25\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, а у випадку з виробами зі спеціальних сталей зазначений параметр має бути меншим за $0,15\text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$.

Отже, фактичні швидкості нагрівання під локальну індукційну термічну обробку зварних виробів та значення тривалості нагрівання повинна вибиратися з урахуванням зазначених вище вимог.

В міру збільшення розмірів зварного виробу, швидкості нагрівання, що визначаються з отримання найменшого перепаду перерізу виробу і по повноті теплофізичних процесів у зварному з'єднанні, зближуються та стають практично рівними один одному, це має велике практичне значення.

Ще одним найважливішим технологічним параметром є температура нагріву зварного виробу, вона відноситься до тих компонентів технологічного процесу, встановлення якої викликає найбільше проблем.

Температура нагрівання залежить від хімічного складу основного матеріалу, його структури в зоні термічного впливу зварювання, а також від структури зварного шва, що характеризується значною хімічною та структурною неоднорідністю.

Очевидно, що вплив всіх цих факторів, досить важко враховується і важко встановити будь-які залежності.

В залежності від потреб термічної обробки та від того що ми хочемо отримати в її результаті варто розглянути основні види.

Висока відпустка. Якщо завданням є часткове зняття залишкової напруги та підвищення пластичності металу зварного з'єднання, то проводиться висока відпустка зварного з'єднання з нагріванням до $650\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$. Цей вид термічної обробки достатньою мірою забезпечує досягнення необхідного результату при роботі зі звареними виробами з маловуглецевих низьколегованих сталей, отриманих методом одноразового зварювання і, отже, досить тонкостінних.

Нормалізація. Якщо термічна обробка проводиться з метою отримання однорідної, досить дрібнозернистої структури, що пройшла перекристалізації,

поліпшення механічних властивостей металу зварного з'єднання, а також ще більш повного зниження рівня залишкової зварювальної напруги, то здійснюється нормалізація зварного з'єднання з нагріванням вище A_{c3} (до температур 900-1100 °C).

Цей вид термічної обробки дозволяє суттєво виправити деякі структурні дефекти зварювання, які не можна усунути при високій відпустці зварних виробів, та підвищити працездатність зварного з'єднання та виробу в цілому. Дана термічна обробка забезпечує дуже якісні результати, якщо вона застосовується на зварних виробках із вуглецевих нелегованих та низьколегованих сталей, з маловуглецевих легованих сталей, отриманих різними методами дугового зварювання, а також з низьковуглецевих сталей, вироблених методом двох-і більше кратного зварювання.

Аустенітизація. Зрештою, якщо завданням термічної обробки є отримання досить однорідної структури аустеніту у всьому зварному з'єднанні, суттєве поліпшення властивостей у ньому і максимально можливе зниження рівня залишкової напруги у виробі, проводиться аустенітизація зварного з'єднання з нагріванням до температур 1050-1250 °C. Цей вид термічної обробки забезпечує добрі результати для зварних виробів зі складнолегованих спеціальних сталей аустенітного класу (жаростійких та жароміцних, корозійностійких та кислотостійких). [5]

Як ще один технологічний параметр термічної обробки – *витримка* після досягнення оптимальної температури локального нагріву хоча і важлива підвищення працездатності зварного з'єднання і зварного виробу в цілому, проте грає меншу роль, ніж інші параметри. Справа в тому, що при нагріванні під високу відпустку значна частина залишкових напружень знімається. При дотриманні нагріву до температур 720–740 °C у зварних виробках з маловуглецевих низьколегованих сталей типу Ст3, 16С, 17ГС, 20 знімається до 80% залишкових зварювальних напружень і витримка стає економічно не вигідною. Що стосується сталей, легованих хромом, молібденом, вольфрамом, ванадієм або мають підвищений вміст вуглецю, то в цьому випадку витримка необхідна для протікання дифузійних процесів та підвищення пластичності зварного з'єднання, але її тривалість слід вибирати експериментально та з урахуванням економічних міркувань.

Охолодження після локального нагріву та витримки. Важливим для цього технологічного параметра термічної обробки зварних з'єднань є те, що охолодження після нагрівання та витримки (за наявності останньої) слід проводити якомога повільніше, щоб уникнути виникнення напружень у зварному з'єднанні.

При високій відпустці зварних з'єднань виробів з маловуглецевих низьколегованих сталей інтенсивність тепловідведення в процесі охолодження повинна бути не нижче 0,5 °C/с та не вище 1,5 °C/с до температур 350–330 °C. Потім теплоізоляцію можна зняти та проводити подальше охолодження у прискореному режимі. Для легованих сталей слід проводити таке охолодження до 320–290 °C. При нормалізації та аустенітизації охолодження після витримки має бути природним, але не прискореним.

Висновки. При відпрацюванні технології нагрівання зварних з'єднань необхідно здійснювати температурний контроль у всіх найбільш відповідальних зонах зварного з'єднання: в центрі шва зовні та зсередини виробу, на стиках шва з основним металом зовні та зсередини по обидва боки від центру шва і, нарешті, на межі зони нагрівання зовні та зсередини по обидва боки від центру шва.

Надалі необхідно час від часу перевіряти правильність дотримання режиму локального нагріву контролем температури у центрі шва на внутрішній поверхні виробу та на межах зони нагрівання по обидва боки від центру шва, а також на внутрішній поверхні виробу.

Перелік посилань

1. Рыбин, В.В., Малышевский, В.А., Хлусова, Е.И., Орлов, В.В., Шахпазов, Е.Х., Морозов, Ю.Д., Настич, С.Ю., & Матросов, М.Ю. (2009). Высокопрочные стали для магистральных трубопроводов. *Вопросы материаловедения*, 3, 127 – 137.
2. Трубы для трубопроводов. *Технические условия*. (2012). Стандарт API Spec 5L PSL2.
3. *Магистральные трубопроводы* (1985). СНиП 2.05.06-85*
4. Кудря, А.В., Соколовская, Э.А., Траченко, В.А., Ле Хай Нинь, Скородумов, С.В., Папина, К.Б. (2015). Измерение неоднородности разрушения в конструкционных сталях с разнородной структурой. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 4, 12 – 18.
5. Savchenko, I., Kozechko, V., & Shapoval, A. (2022). Method for Accelerating Diffusion Processes When Borating Structural Steels. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 793-800. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_94
6. Погоржельский, В. И. (1979). Технология контролируемой прокатки низколегированных сталей. *Производство высококачественного проката*, 10 – 20.
7. Воробьева А.С. Романцов А. И., Головин В.В., Пашнин В.П., Усанов К.А., Баричко В.С., & Баричко С.С. (2016). Разработка и внедрение инновационной технологии термической обработки полых металлических изделий. *Сборник материалов XXII международной научно-практической конференции Трубы 2016*, 55-61.
8. Pilipenko, V., Grigorenko, S, Kozechko, V, & Bohdanov, O. (2021). A deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the ti-3AL-2.5V alloy. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1): 78 – 83. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/078>

ABSTRACT

Purpose. The aim of the work is to assess the possibilities of manufacturing large diameter pipes for main pipelines, analysis of requirements for pipe billet in terms of chemical composition and mechanical properties, as well as prospects for heat treatment to improve mechanical and operational properties of main pipelines. An overview of the requirements for sheet metal for the manufacture of large diameter pipes, as well as the features of heat treatment to remove the final stresses. Peculiarities of weld heat treatment and influence of temperature on mechanical properties and structure of both base metal and welding zone are considered.

The methods. The methodological basis of the study included analysis, comparison and systematization. To achieve the goal of research and solving the tasks used a set of modern research methods and developments of world manufacturers. For large diameter pipes it is better to use the periodic method of induction heat treatment, which will provide flexibility in the implementation of heat treatment modes.

Findings. Systematized requirements for the quality and chemical composition of materials for pipe blanks. As a result, it was found that we can recommend a change in chemical composition, control

of thermomechanical rolling parameters and accelerated cooling technology, which can result in a bainitic structure that will improve the mechanical and operational characteristics of main pipelines. When testing the technology of heating welded joints, it is necessary to carry out temperature control in all the most responsible areas of the welded joint.

The originality. The scientific novelty is the development of recommendations and systematization of existing methods and technologies for the manufacture of pipes for main pipelines.

Practical implimentation. The main requirements to the main pipelines are considered in the work. Systematized requirements for rolling for the manufacture of pipes, features of heat treatment and its impact on the structure and mechanical properties of the base metal and weld. The main methods of heat treatment and their influence on the properties of large diameter pipes are shown.

Keywords: *main pipelines, heat treatment, weld, large diameter pipes, normalization.*