

Корисна модель належить до листового прокату, який застосовують також у будівництві.

Сталевий листовий прокат товщиною 51-100 мм (далі позначається терміном "плита") широко використовують в інфраструктурному будівництві, суднобудуванні, енергетичному секторі, важкому машинобудуванні та в інших галузях промисловості. Плити категорій міцності S235 та S275 за стандартом ДСТУ EN 10025-2 виробляють, в основному, із низьковуглецевої конструкційної сталі, виплавленої без застосування легуючих (Cr, Ni, Mo, Cu), або мікролегуючих (V, Ti, Nb) добавок. За стандартною технологією плити виробляють методом гарячої прокатки, виконуючи її без пауз та завершуючи при температурі не нижче 1000°C [1]. За патентом України на винахід № 52991 (B21B1/38) [2] гарячу прокатку товстих листів виконують послідовно у чорновій кліті та в чистовій кліті, приділяючи увагу розбиванню ширини листа при поперечному прокатуванні у чорновій кліті з урахуванням мінімізації фактора форми в межах $F_h=0,35-0,62$, при цьому не регламентуються температурно-силові параметри на кожній із стадій прокатки.

Висока температура закінчення гарячої прокатки призводить до зростання зерна, що погіршує механічні властивості плит. Для виправлення гарячекатаної структури та забезпечення вимог стандарту плити піддають об'ємній термічній обробці - нормалізації - з нагрівом в аустенітну область та охолодженням на повітрі [3]. Нормалізація виправляє (нормалізує) крупнозернисту структуру гарячекатаного металу, формуючи дрібнозернисту ферито-перлітну мікроструктуру, яка забезпечує необхідний рівень механічних властивостей. Проведення нормалізації потребує використання окремого нагріву; це пов'язано із використанням значного обсягу енергоносіїв, що підвищує технологічні витрати виробників та знижує рентабельність продукції.

Відомим є застосування термодереформаційної обробки (її різновидів - нормалізуючої прокатки, контрольованої прокатки) для виготовлення сталевих листових продукції. В цьому випадку закінчення прокатки проводять за більш низької (відносно 1000 °C) температури, контролюючи ступінь обтиснення та температуру металу на різних стадіях. Це дозволяє запобігти укрупненню зерна й отримати дрібнозернисту сталь з підвищеним комплексом механічних властивостей. Термодереформаційна обробка є енергозбережною, оскільки дозволяє отримувати підвищені властивості без застосування термічної обробки з окремим нагрівом.

У випадку нормалізуючої прокатки, дереформацію завершують за температури, яка приблизно дорівнює температурі нагріву сталі в разі проведення нормалізації. Для низьковуглецевих конструкційних марок сталі така температура лежить в нижній частині аустенітної області, в межах 850-950 °C [4]. Нормалізуюча прокатка дозволяє отримати мікроструктуру із подрібненим зерном, аналогічну або близьку до структури нормалізованої сталі; при цьому виключається необхідність проведення нормалізації. Оскільки дереформація металу закінчується за більш низької температури, аніж при гарячій прокатці, то при нормалізуючій прокатці відбувається певне гальмування динамічної рекристалізації дереформованого металу, тобто результат дереформації у вигляді накопичених дефектів кристалічної будови частково зберігається в сталі, сприяючи зростанню міцності. Тому, нормалізуючу прокатку в певному сенсі відносять до термодереформаційної обробки ("recrystallization controlled rolling" [5]). Гальмуванню рекристалізації сприяє мікролегування сталі сильними карбідоутворюючими елементами Nb та V [5], які утворюють дисперсні карбонітриди, що ефективно закріплюють дислокації, перешкоджаючи їх руху та анігіляції.

Найбільш близьким аналогом є спосіб термодереформаційної обробки, описаний в патенті України UA 98891 [6], у якому прокатка листової низьковуглецевої мікролегованої сталі, що включає нагрів та витримку слябів, чорнову і чистову прокатки до потрібної товщини листа з подальшим уповільненим охолодженням, проводять таким чином, що охолодження прокату починають одразу після кінця чистової прокатки від температури 900-950 °C та продовжують охолоджувати до 200-250 °C зі швидкістю 15-30 °C/с. Вказану технологію застосовують в разі мікролегування сталі такими елементами, як Nb та V, що суттєво підвищує її вартість і зменшує рентабельність виробництва плит. Тому виробники металургійної продукції намагаються випускати плити із нелегованих марок сталі, підвищуючи їх властивості за рахунок застосування термодереформаційної обробки. Якщо застосувати технологію-аналогу до нелегованої сталі, то це призведе до укрупнення зерна та формування різнозернистості (внаслідок закінчення прокатки при відносно високій температурі), що негативно позначиться на низькотемпературній ударній в'язкості сталі (при випробуваннях нижче 0 °C).

В основу корисної моделі поставлена задача підвищити низькотемпературну ударну в'язкість плит товщиною 51-100 мм із конструкційної сталі вуглецевих марок.

Поставлена задача вирішується тим, що спосіб термодереформаційної обробки плит товщиною від 51-100 мм із низьковуглецевої нелегованої сталі, що включає нагрів та витримку слябів, чорнову та чистову стадії прокатки із остаточним охолодженням, згідно з корисною моделлю, чистову стадію виконують з сумарним обтисненням 15-20 % товщини слябу та закінчують при температурі металу, яка становить $T=[1075 \cdot (h)^{-0,06}] \pm 10$ °C, де h - задана товщина плити у мм, а охолодження проводять на повітрі.

Для досягнення вищевказаного результату в способі термодереформаційної обробки плит товщиною

51-100 мм із низьковуглецевої нелегованої сталі, що включає нагрів та витримку слябів, чорнову та чистову стадії прокатки із остаточним охолодженням, відповідно до корисної моделі, чистову стадію виконують з сумарним обтисненням 15-20 % товщини слябу та закінчують при температурі металу, яка становить: $T=[1075 \cdot (h)^{-0.06}] \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, (1), де h - задана товщина плити, мм, а охолодження проводять на повітрі.

Пропонований спосіб термдеформаційної обробки плит товщиною 51-100 мм із низьковуглецевої нелегованої сталі складається з таких подібних ознак (виконання дій):

- нагрів та витримку слябів;
- чорнову та чистову стадії прокатки;
- остаточне охолодження.

В результаті зіставного аналізу пропонованого способу та аналога встановлено, що спосіб, який запропонований, має відмінні ознаки - нові умови виконання дій (параметри режиму), а саме:

- чистову стадію виконують з сумарним обтисненням 15-20 % товщини слябу та закінчують при температурі металу, яка становить

$T=[1075 \cdot (h)^{-0.06}] \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, де h - задана товщина плити (мм);

- охолодження проводять на повітрі.

Поміж відмінними ознаками та технічним результатом є причинно-наслідковий зв'язок.

Результати досліджень показують, що за відсутності в сталі мікролегування V та Nb, температуру чистової стадії прокатки (її початку та закінчення) треба знижувати відносно відомого способу, щоб запобігти укрупненню рекристалізованого зерна аустеніту. Зниження температури закінчення чистової прокатки загальмує ріст рекристалізованих зерен аустеніту, відповідно забезпечивши утворення дрібних зерен фериту при переході критичної точки A_{r3} . Температуру закінчення чистової стадії прокатки пропонується вибирати відносно кінцевої товщини плити відповідно до співвідношення $T=[1075 \cdot (h)^{-0.06}] \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, де h - задана товщина плити мм. При застосуванні цього співвідношення кінцева температура прокатки плит товщиною 51-100 мм становитиме 805-859 $^{\circ}\text{C}$, пропорційно знижуючись із 859 $^{\circ}\text{C}$ (для плит товщиною 51 мм) до 805 $^{\circ}\text{C}$ для плит товщиною 100 мм. При температурі кінця прокатки вище 859 $^{\circ}\text{C}$ рекристалізація аустеніту буде розвиватися відносно швидко, призводячи до формування крупного зерна фериту в готовому прокаті із відповідним зниженням низькотемпературної ударної в'язкості. Зниження температури кінця прокатки менше 805 $^{\circ}\text{C}$ підвищить міцність сталі внаслідок ефекту деформаційного зміцнення, що погіршить пластичність та низькотемпературну ударну в'язкість.

Зворотно-пропорційна залежність між кінцевою товщиною плити та температурою кінця чистової прокатки пояснюється тим, що з потовщенням прокату зростає градієнт температур по перерізу, тобто всередині плити зберігається підвищена температура, яка може перевищувати верхню задану границю інтервалу, тобто 859 $^{\circ}\text{C}$. Це викличе формування різнозернистості по висоті плити і погіршить її властивості в напрямку товщини прокату.

Не менш важливим є регламентація сумарного обтиснення на стадії чистової прокатки. Перед початком чистової стадії аустеніт має крупне зерно, яке виросло впродовж паузи між чорною та чистовою стадіями прокатки. На чистовій стадії необхідно забезпечити такий ступінь деформації металу, щоб забезпечити протікання рекристалізації і подрібнення зерна аустеніту перед початком його фазового перетворення. Заявлена величина сумарного обтиснення (15-20 % товщини слябу) є оптимальною з огляду на отримання необхідного деформованого стану аустеніту. За меншої величини сумарного обтиснення в аустеніті не відбудеться рекристалізаційного подрібнення зерна, і при фазовому перетворенні утвориться крупнозерниста феритна структура. Більш високі сумарні обтиснення потребуватимуть більш великих зусиль прокатки (враховуючи знижену температуру металу і, відповідно, його меншу здатність до пластичної деформації), що збільшить навантаження на прокатну кліть, або потребуватиме значної кількості проходів з малим обтисненням. В обох випадках підвищаться витрати електроенергії в процесі прокатки, зросте знос прокатного обладнання.

Приклад здійснення способу термдеформаційної обробки сталевих плит товщиною 51-100 мм відповідно до формули корисної моделі.

У виробничих умовах металургійного підприємства виготовили сталеві плити товщиною 60 мм за категорією міцності S275J2 (ДСТУ EN 10025-2). Для даного виду продукції стандартом задані наступні параметри: опір плинності - не нижче 255 МПа, межа міцності - 410-560 МПа, відносне подовження - не нижче 20 %, поглинена енергія удару при -20 $^{\circ}\text{C}$ - не нижче 27 Дж.

Хімічний склад сталі становив: 0.12 % C; 1.55 % Mn; 0.24 % Si; 0.003 % S; 0.12 % P; 0.033 % Al. Плити прокатували зі слябів товщиною 220 мм, отриманих киснево-конверторним способом із безперервним розливанням сталі. Сляби нагрівали до 1150-1180 $^{\circ}\text{C}$, витримували 5 год. і прокатували на стані 3000. Після чорнової стадії робили паузу для охолодження на повітрі, після чого виконували чистову стадію прокатки, змінюючи величину сумарного обтиснення та кінцеву температуру чистової стадії прокатки. За кожним з режимів виготовляли по 3 плити. Прокатані плити охолоджували на повітрі та збирали в штаби. Параметри термдеформаційної обробки наведені в таблиці 1.

Також було виготовлено плити за режимом, вибраним як аналог. В цьому випадку, після закінчення чистової стадії прокатки плити охолоджували до 200-250 °C зі швидкістю 15-30 °C/с.

Для плит товщиною 60 мм оптимальна температура кінця чистової стадії прокатки, розрахована згідно із співвідношенням (1), знаходилась в межах 831-851 °C. Сумарне обтиснення на чистовій стадії згідно із формулою корисної моделі (з урахуванням товщини слябу - 220 мм) становило 33-44 мм.

З кожної плити вирізали по 2 проби розмірами 300×300 (мм) в плані, з яких на глибині ¼ товщини плити відібрали зразки для атестації механічних властивостей згідно з вимогами ДСТУ EN 10025-2.

Міцність та пластичність сталі визначали випробуваннями на розтяг відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019.

Низькотемпературну ударну в'язкість оцінювали поглиненою енергією руйнування, яку визначали згідно з ДСТУ ISO 148-1:2022 на призматичних зразках розмірами 10×10×55 (мм) із V-образним надрізом. Температура зразків в момент удару становила -20 C. На кожну пробу випробовували по три зразки. Згідно із стандартом, результат випробувань вважався задовільним, якщо середнє значення результатів для трьох зразків було не нижчим за 27 Дж, при цьому допускалось, щоб на одному із зразків значення енергії було не нижчим за 19 Дж.

Результати випробувань наведені в таблиці.

Таблиця

Параметри термдеформаційної обробки та механічні властивості сталевих плит товщиною 60 мм

Номер варіанту	Сумарне обтиснення на чистовій стадії прокатки, мм (%)	Температура кінця чистової стадії прокатки, °C	Опір плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Поглинена енергія удару при -20 °C, Дж. Розкид значень (результат атестації)
1	22 (10)	790	395	488	24	6-135 незадовільно
2	33 (15)	832	345	457	30	165-208 задовільно
3	37 (17)	841	355	433	30	202-245 задовільно
4	44 (20)	850	340	458	31	178-215 задовільно
5	57 (26)	875	375	475	25	14-і 52 незадовільно
Аналог	35 (16)	925	289	407	33	12-85 незадовільно

Аналіз результатів випробувань показує, що у разі проведення термдеформаційної обробки з використанням заявлених параметрів (варіанти №№ 2-4), механічні властивості сталевих плит товщиною 60 мм повністю відповідали вимогам стандарту для категорії S275J2, включаючи поглинену енергію удару при низькій температурі. Якщо сумарне обтиснення, або температура кінця чистової прокатки виходили за заявлені межі (вираховані для товщини 60 мм), як це було у варіантах № 1 та № 5, то плити не проходили атестацію за величиною поглиненої енергії удару при -20 °C: фіксували великий розкид значень енергії з отриманням окремих значень нижче допустимого рівня (19 Дж).

При реалізації способу обробки за аналогом спостерігалось зниження показників міцності, хоча вони залишались в межах норми. Втім, значення поглиненої енергії удару виявились на найнижчому рівні і, в цілому, не відповідали вимогам стандарту.

Таким чином, апробація термдеформаційної обробки плит товщиною 51-100 мм із низьковуглецевої нелегованої сталі, показує, що застосування заявлених значень сумарного обтиснення, температури кінця чистової прокатки та охолодженню на повітрі супроводжується покращенням комплексу механічних властивостей сталі за рахунок стабілізації рівня низькотемпературної ударної в'язкості сталі (визначається енергією удару, поглиненою при -20 °C).

Джерела інформації:

1. Серeda Б. П. Прокатне виробництво: навчальний посібник для студентів ВНЗ / Б.П. Серeda; Запорізька державна інженерна академія. - Запоріжжя: Вид-во Запорізької державної інженерної академії, 2008. - 310 с. ISBN 978-966-7101-96-1.

2. Патент на винахід № 52991. Спосіб гарячої прокатки товстих листів, МПК B21B 1/38. Опубліковано 15.03.2005 р., Бюлетень. № 3/2005.

3. W. Xin-li, Z. Mei, J. Bo, L. Zhang, Y. Liu. Effect of normalizing temperature on microstructure and mechanical properties of a Nb-V microalloyed large forging steel. Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 671. pp. 233-243, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.06.059>.

4. Knapieński M., Koczurkiewicz B., Kawalek A., Dyja H. The Physical Simulation of the Normalizing Rolling of the Steel Plate in Strength Category 350÷460MPa. Materials Science Forum, 2010. Vol. 638-642. pp. 2604-2609. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.638-642.2604>.

5. Gorni A.A., Soares da Silva M.R. Microstructural evolution of the normalizing plate rolling of niobium microalloyed steels. *Tecnologia em Metalurgia, Materials e Mineracao*, 2015, Vol. 12(1). pp.72-76, <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.0750>.

6. Патент на корисну модель UA 98891. Спосіб термомеханічної обробки листової низьковуглецевої мікролегованої сталі з формуванням структури голчастого фериту. МПК В21В 45/02 (2006.01). Опубліковано 12.05.2015, Бюлетень № 9.