

With the help of ANSYS software analyzes the stress - strain state multisupporting root joint rotor blades of a compound steam turbines

**Key words:** stress - strain state, root joint, rotor blade, the steam turbine

**УДК 669.1.002.5:621.78**

**В. Г. ЛЯСОВ**, Директор прокатного департамента, ПАО «Арселор Миттал Стил Кривой Рог»;

**А. В. МАМАЕВ**, менеджер, ПАО «Арселор Миттал Стил Кривой Рог»;

**П. А. ЖИТНИКОВИЧ**, старший мастер, ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог»;

**С. О. МАЦЫШИН**, аспирант, Metallurgical Institute of GBUZ «Krivorozhskiy nationalnyy universitet»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРОКАТА НА КОМПЛЕКС СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

В статье описаны технология производства термоупрочненной арматуры с прокатного нагрева и результаты проведенного ускоренного охлаждения и термического упрочнения арматурного проката Ø 12 мм на класс А500С из стали СтЗТРпс в потоке мелкосортного стана 250-4 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог». Установлено, что у поверхности микроструктура металла состоит из отпущенного мартенсита, за ободком со структурой отпущенного мартенсита следует переходная зона со структурой нижнетемпературного бейнита с участками троостита.

**Ключевые слова:** термоупрочненная арматура, ускоренное охлаждение, термическое упрочнение, отпущенный мартенсит, нижнетемпературный бейнит, троостит.

**Введение.** Арматурный прокат является основным видом армирования железобетонных конструкций, объемы и применение которых в Украине и за рубежом неуклонно возрастают.

**Анализ последних исследований и литературы.** Основным объектом исследований является наиболее массово применяемый в современном строительстве арматурный прокат класса А500С. Производство проката класса А500С, широко применяемого за рубежом, потребовало проведения комплекса научно-исследовательских работ, направленных на обеспечение внедрения арматурного проката по ДСТУ 3760-98(2006) в строительную практику Украины [1].

Непрерывное наращивание объемов производства арматурной стали не всегда является целесообразным. Актуальное значение приобретает необходимость экономного расходования стали в качестве армирующего материала, что в первую очередь может быть достигнуто путем увеличения его прочности.

Упрочнение проката в потоке станов путем его интенсивного охлаждения с прокатного нагрева дает возможность при низкой стоимости передела существенно повысить прочностные свойства стали данного химического состава или получить требуемые свойства при пониженном содержании в стали легирующих элементов [2].

При термическом упрочнении стержневой арматуры в потоке непрерывного стана методом прерванной закалки по сечению изделия формируются слои, обладающие различной структурой. Конечный комплекс свойств арматуры

определяется соотношением толщин структурных слоев, зависящих от режимов охлаждения, марки стали, степени горячей деформации.

Поскольку непосредственно в процессе самого термического упрочнения и на последующих этапах производства проката (арматуры) или переработки исходные структуры стали могут подвергаться тепловому воздействию (самоотпуску, отпуску, нагреву при сварочном цикле, электронагреву и т.д.), то окончательные свойства продукции будут определяться конечным структурным состоянием. Поэтому термически упрочненная арматурная сталь после повторного нагрева должна сохранять механические свойства, соответствующие тому классу прочности, по которому она была изготовлена на металлургическом заводе.

**Цель работы.** Целью является исследование работы линии ускоренного охлаждения и термического упрочнения в потоке мелкосортного стана 250-4 ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог» с целью выработки рекомендаций по организации энергосберегающих режимов охлаждения и режимов прерывистого охлаждения во избежание образования мартенситной структуры.

**Материалы исследований.** Разработка технологии термомеханического упрочнения проката на МС 250-4.

**Обсуждение результатов.** На мелкосортном стане 250-4 осуществляется прокат арматуры диаметром 12 мм из стали марки СтЗТРпс на класс 460 (BS 4449 спецификация британского стандарта на сортовой прокат из углеродистой стали для армирования бетона), А400С и А500С.

Линия ускоренного охлаждения (ЛУО) и термического упрочнения проката (рис. 1) расположена между последней чистовой клетью прокатного стана и холодильником.

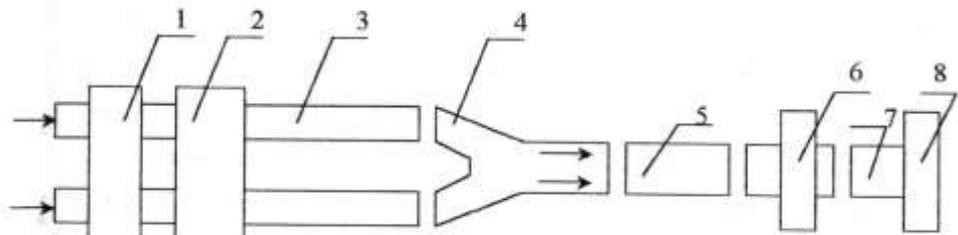


Рис. 1 – Линия ускоренного охлаждения МС 250-4 СПЦ-2 ПАО «АМКР»: 1 - отсечка противоточная, 2 – форсунка, 3 – камера охлаждения первая (L=3,2 м), 4 – «сводка» (L=1,5 м), 5 – камера охлаждения вторая (L=1,2 – 1,5 м), 6 – отсечка ((L=3,0 – 2,2 м), 7 – камера охлаждения холостая, 8 – отсечка воздушная

Технология производства термоупрочненной арматуры с прокатного нагрева в условиях МС 250-4 характерна для так называемого Темпкор-процесса, разработанного в начале 70-х годов в Бельгии и независимо разработанного в СССР для производства термоупрочненной арматуры класса Ат- III [3].

Название «Темпкор» принято для процесса по принципу, на котором он основан: отпуск предварительно закаленного поверхностного слоя под воздействием тепла, поставляемого сердцевиной изделия.

Процесс протекает в четыре стадии. Первая стадия – быстрое охлаждение по всем ступеням ЛУО, начинающееся сразу же после выхода прутка из последней чистовой клетки. В течении этой стадии осуществляется закалка поверхностного слоя на некоторую глубину. В конце этой стадии прутки имеют аустенитную сердцевину, окруженную приповерхностным слоем, который состоит из мартенсита. Продолжительность первой стадии должна зависеть от температуры конца прокатки, возрастая с ее увеличением, диаметра арматуры и марки стали.

На второй стадии процесса прутки покидают зону быстрого охлаждения водой

и охлаждается на воздухе. В момент прекращения водяного охлаждения коэффициент теплоотдачи окружающей среде очень мал из-за низкой температуры поверхности (150-250 °С), а температурный градиент по сечению прутка, наоборот, очень высокий. Поэтому тепло из сердцевины начинает быстро поступать к поверхности, нагревая ее. К концу этой стадии происходит выравнивание температуры по сечению с установлением среднemasсовой температуры, которую принимают за температуру самоотпуска. Во время второй стадии происходит отпуск образовавшегося в приповерхностном слое мартенсита. Сердцевина прутка продолжает оставаться в аустенитном состоянии. Длительность этого периода определяется диаметром прутка и условиями охлаждения на первой стадии.

Третья стадия процесса наступает, когда прутки оказываются уже на холодильнике. Эта стадия представляет собой квазиизотермическое превращение аустенита центральных зон прутка. Продуктами этого превращения могут быть либо смесь феррита и перлита, либо смесь феррита, перлита и бейнита в зависимости от таких факторов, как состав стали, диаметр прутка, температура конца прокатки, эффективность и длительность охлаждения на первой стадии.

Четвертая стадия – охлаждение прутка на холодильнике до температуры окружающей среды после завершения в металле структурных превращений [3].

Ускоренное охлаждение и термическое упрочнение арматурного проката Ø 12 мм на класс А500С в потоке МС 250-4 осуществляется при следующих параметрах прокатки:

- давление охлаждающей воды перед форсункой: до 2,5 МПа;
- скорость прокатки: 13,0 – 13,6 м/с;
- температура конца прокатки: 1050 – 1100 °С;
- температура охлаждающей воды перед форсункой: 20 – 45 °С.

В результате металлографических исследований поперечных микрошлифов проб арматурного проката стали Ст3ТРпс класса А500С диаметром 12 мм было установлено, что на всех пробах имеет место темнотравящийся ободок глубиной от 1,4 мм до 1,8 мм.

В результате микроисследования установлено, что у поверхности микроструктура металла состоит из отпущенного мартенсита. За ободком со структурой отпущенного мартенсита следует переходная зона со структурой нижнетемпературного бейнита с участками троостита.

Формирование подобной микроструктуры объясняется на основании результатов, полученных при моделировании процесса ускоренного охлаждения и термоупрочнения арматурного проката.

Поверхность прутка охлаждается со скоростью более 1000°С/с, в результате чего аустенит поверхностной зоны претерпевает мартенситное превращение. Температура начала аустенитно-мартенситного превращения для стали марки Ст3ТРпс была принята равной  $M_n = 500^\circ\text{C}$ . Область температур начала промежуточного (бейнитного) превращения от 550 °С до  $M_n$  [4].

Аустенит средних слоев проката охлаждается со скоростью 380 – 850 °С/с до 550 °С/с без каких-либо фазовых превращений. Аустенит центральной зоны претерпевает охлаждение от температуры конца прокатки до т. Ar1 ( $\approx 727^\circ\text{C}$ ) со скоростью 150 – 380 °С/с.

Таким образом, на выходе из последней ступени линии ускоренного охлаждения по сечению проката образуются участки со следующей

микроструктурой (рис. 2, 3).

Участок 1: поверхностный слой глубиной 1,4 – 1,8 мм с температурным полем от  $t_{пов} = 125-130\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $M_n = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  со структурой аустенитно-мартенситного превращения.

Участок 2: переходная зона со структурой аустенита, охлажденного ниже температуры бейнитного превращения.

Участок 3: средняя часть со структурой переохлажденного аустенита ниже  $t. Ar_1$ .

Участок 4: средняя часть прутка со структурой аустенита в интервале температур от  $Ar_3$  до  $Ar_1$ .

Участок 5: сердцевина прутка со структурой аустенита при температуре выше  $t. Ar_3$  ( $\approx 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

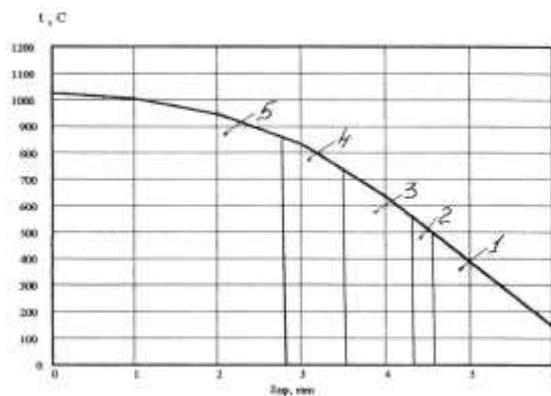


Рис. 2 – Распределение участков с различной микроструктурой по радиусу проката в конце процесса охлаждения водой



ободок

переходная зона

$\frac{1}{2}$  радиуса

Рис. 3 – Микроструктура металла

Участки 2, 3, 4 и 5 не успевают претерпеть каких-либо превращений аустенита вследствие больших скоростей охлаждения.

Таким образом, после прекращения ускоренного охлаждения внутри проката находится слой толщиной  $\frac{3}{4} R_{пр}$  в аустенитном состоянии. При дальнейшем охлаждении на воздухе в течении  $\approx 1,75\text{ с}$  за счет тепла сердцевины происходит выравнивание температур по сечению с установлением температуры самоотпуска в пределах  $500 - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это происходит к разогреву закаленного поверхностного слоя с образованием структуры отпущенного мартенсита (сорбита отпуска) и переходной зоны со структурой нижнетемпературного бейнита.

Дальнейшее охлаждение на воздухе со скоростью  $4 - 6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  от температуры самоотпуска до температуры окружающей среды приводит к образованию в основном сечении прутка мелкой феррито-цементитной смеси, называемой трооститом [4].

Для возможности прогнозирования механических свойств готового проката были обработаны экспериментальные данные с целью выявления количественной связи между объемами образующихся фаз структуры и механическими свойствами. Это было сделано на том основании, что простое линейное соотношение между

свойствами (особенно) прочности и объемной долей фаз часто сводится к идеализированному закону смешения, что практически вполне приемлемо [5].

Таким образом, прочностные свойства стали, как природного композита, рассчитывали по правилу смесей [6,7 14,15].

$$\sigma = \sigma_m \cdot V_m + \sigma_{tr} \cdot V_{tr},$$

где  $\sigma_m, \sigma_{tr}$  - прочностные характеристики мартенсита и троостита, МПа;

$V_m, V_{tr}$  - объемные доли фаз.

При этом долей образующегося нижнетемпературного бейнита пренебрегали, объединяя ее с долей троостита.

**Выводы.** Промышленные испытания подтвердили возможность ускоренного охлаждения и термического упрочнения арматурного проката диаметром 12 мм на класс А500С из стали марки Ст3ТРпс в потоке стана 250-4 .

**Список литературы:** 1. *Шеремет, В. А.* Научные исследования, современное состояние, перспективы развития производства и применение арматурного проката для железобетонных конструкций [Текст] / *В. А. Шеремет, А. В. Кекух, Н. П. Жильцов и др.* // Теория и практика металлургии. – 2004. - №3-4. – С. 121-127. 2. *Узлов, И. Г.* Термическая обработка проката [Текст] / *И. Г. Узлов, В. Я. Савенков, С. Н. Поляков.* – Киев: Техника, 1981. – 159 с. 3. *Кугушин, А. А.* Высокопрочная арматурная сталь [Текст] / *А. А. Кугушин, И. Г. Узлов, В. В. Калмыков, С. А. Мадатян, А. В. Ивченко.* – М.: Металлургия, 1986. – 272 с. 4. *Самохоцкий, А. И.* Металловедение [Текст] / *А. И. Самохоцкий, М. Н. Кунявский, Т. М. Кунявская, Н. Г. Парфеновская, Н. А. Быстрова.* – М.: Металлургия, 1990. – 416 с. 5. *Пикеринг, Ф. Б.* Физическое металловедение и разработка сталей: Перев. с англ. [Текст] / *Ф. Б. Пикеринг.* – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.

*Поступила в редколлегию 25.11.2013*

УДК 669.1.002.5:621.78

**Исследование влияния технологии термомеханического упрочнения проката на комплекс структурных составляющих и прогнозирование механических свойств / Лясков В. Г., Мамаев А. В., Житникович П. А., Мацьшин С. О.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ», – 2013. - № 70 (1043). – С.17-21 . – Бібліогр.: 5назв.

В статті описані технологія виробництва термозміцненої арматури з прокатного нагріву та результати проведеного прискореного охолодження та термічного зміцнення арматурного прокату Ø 12 мм на клас А500С зі сталі Ст3ТРпс в потоці дрібно сортового стану 250-4 ПАО «Арселор Міттал Кривий Ріг». Встановлено, що у поверхні мікроструктура металу складається з відпущеного мартенситу, за ободком зі структурою відпущеного мартенситу знаходиться перехідна зона зі структурою низькотемпературного бейніту з ділянками троститу.

**Ключові слова:** термозміцнені арматура, прискорене охолодження, термічне зміцнення, відпущений мартенсит, низькотемпературний бейніт, тростит.

In article are described the production technology of the thermostrengthened fittings from rolling heating and results of the carried-out accelerated cooling and thermal hardening of rebar of Ø 12 mm on the class A500C from St3trps steel in a stream of a light section mill 250-4 PJSC "Arselor Mittal Krivoi Rog". It is established that at a surface the microstructure of metal consists of the released martensite, the rim with structure of the released martensite is followed by a transitional zone with structure of lowtemperature bainite with parts of troostite.

**Keywords:** the thermostrengthened fittings, the accelerated cooling, the thermal hardening, the released martensite, lowtemperature bainite, troostite.