

УДК 621.771:04.08:681.5

В.Н. Куваев, В.А. Чигринский, Д.А. Иванов

## ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ АРМАТУРНОГО ПРОКАТА

*Проанализированы проблемы управления процессом термоупрочнения для получения заданных механических свойств арматурного проката. Показано, что управление необходимо осуществлять на основе контроля двух параметров – среднемассовой температуры проката и количества магнитной фазы в его сечении на выходе установки термоупрочнения. В процессе управления необходимо обеспечить постоянство отношения отклонений данных параметров от базовых величин.*

*Ключевые слова: арматурный прокат, управление термоупрочнением, механические свойства, среднемассовая температура, магнитная фаза.*

*Проаналізовані проблеми управління процесом термозміцнення для здобуття заданих механічних властивостей арматурного прокату. Показано, що управління необхідно здійснювати на основі контролю двох параметрів – середньомасової температури прокату і кількості магнітної фази в його перетині на виході установки термозміцнення. В процесі управління необхідно забезпечити постійність відношення відхилень даних параметрів від базових величин.*

*The problems of control the thermostrengthening process for receipt the set mechanical properties of reinforce metal are analysed. It is showed that control must be carried out on the basis of measuring two parameters - middlemass temperatures of metal and quantity of magnetic phase in his cross section on the output of thermostrengthening setting. In the process of control is necessary to provide constancy of relation these parameters declinations from base sizes.*

### Введение

Использованием технологии термического упрочнения арматурного проката достигается снижение расхода легирующих элементов от 21,4 до 17,5 кг на одну тону стали [1,2].

Однако, разброс механических свойств термоупрочненного арматурного проката в 2ч3 раза выше, чем у горячекатаного. Это связано с неравномерностью этих свойств по длине раската из-за неравномерной скорости движения прутка арматуры через охлаждающее устройство и, как следствие, неравномерности среднемассовой температуры по длине проката, а также - с колебаниями химического состава стали как от заготовки к заготовке из-за ликваций химических элементов, прежде всего углерода, по высоте слитка, так и от плавки к плавке [3].

Так, увеличение содержания углерода на 0,01% в термомеханически упрочненной стали Ст5 повышает временное сопротивление разрыву  $\sigma_{\text{в}}$  10ч15 Н/мм<sup>2</sup> и предел текучести  $\sigma_{\text{т}}(\sigma_{0,2})$  на 15ч20 Н/мм<sup>2</sup> при снижении относительного удлинения  $\delta_5$  на 0,3ч0,5% (абсолютных) [1,4]. Тогда как для производства термоупрочненного проката класса А500С в условиях

ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» используются стали с плавочным содержанием углерода от 0,17% до 0,25% (разброс содержания углерода в плавках – 0,07%). Неравномерность же содержания химических элементов по высоте слитка носит случайный характер. По данным работ [5,6,7], для разных слитков предельные отклонения содержания углерода по его высоте носят случайный характер и составляют от 0,02% до 0,11%.

Таким образом, только из-за колебаний химического состава стали следует ожидать разброс временного сопротивления разрыву проката одной плавки до 110 Н/мм<sup>2</sup> и - до 180 Н/мм<sup>2</sup> при производства проката из стали с различным плавочным химическим составом, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в [8].

Поскольку для временного сопротивления разрыву по отечественным и российским стандартам допустимое превышением нормируемой величины составляет 200 Н/мм<sup>2</sup> [9], то производство термоупрочненного проката предъявляет повышенные требования к точности настройки режима термоупрочнения.

При производстве же арматурного проката по британским стандартам с полем допуска на временное сопротивление разрыву 150 Н/мм<sup>2</sup> уже недостаточно точно настроить режим термоупрочнения – необходимо корректировать его при смене прокатываемой плавки.

Механические свойства термоупрочненной арматурной стали определяются, главным образом, ее химическим составом, прежде всего массовой долей в ней углерода, и среднемассовой температурой на выходе установки термоупрочнения (температурой самоотпуска проката на холодильнике) – температурой фазового превращения металла сердцевинного слоя проката [1,4,10,11].

Фактически единственным параметром, посредством которого возможно управлять механическими свойствами, является его среднемассовая температура на выходе установки принудительного охлаждения. Управление же заключается в воздействии на режим принудительного охлаждения проката с целью получения его среднемассовой температуры в зависимости от текущего химического состава термоупрочняемой стали для обеспечения требуемых механических свойств.

#### **Анализ состояния вопроса**

При производстве арматурного проката его механические свойства контролируются путем выборочных механических испытаний готовой продукции. Отбор проб для них производится на стационарных ножницах на выходе холодильника, т.е., как минимум, через 10ч20 мин. после завершения термомеханической обработки проката, в результате которой и формируются свойства готовой продукции, а промежуток времени до получения результатов испытаний может достигать одного часа [8]. Поэтому оперативное управление процессом термоупрочнения на основе непосредственного контроля механических свойств нереализуемо.

Следовательно, результаты механических испытаний могут быть использованы только для проверки корректности управления.

Таким образом, первой проблемой управления процессом термоупрочнения арматурного проката является оперативное прогнозирование механических свойств арматурного проката по наблюдаемым параметрам.

Основным наблюдаемым параметром, используемым на большинстве современных станах для прогнозирования механических свойств, является среднемассовая температура проката. Данная температура контролируется на холодильнике – после ее выравнивания по сечению проката [12]. Как правило, пирометр визируется на прокат, лежащий во втором-третьем рихтовальном желобе холодильника. То есть, среднемассовая температура контролируется в одной точке, что не позволяет оценить изменение механических свойств по длине проката из-за неравномерной скорости движения прутка арматуры через охлаждающее устройство. При прокатке профилеразмеров небольших сечений технически сложно обеспечить точность визирования пирометра на прокат и, следовательно, достоверность измерения. На отечественных двухниточных станах проблема контроля среднемассовой температуры усугубляется сложностями с размещением и тяжелыми условиями эксплуатации средств контроля на холодильнике.

При контроле среднемассовой температуры на холодильнике, время от выхода контролируемого сечения проката из установки термоупрочнения до попадания его в поле зрения пирометра соизмеримо либо больше периода прохождения проката контролируемой заготовки через трассу термоупрочнения.

Такое время запаздывания и выборочность контроля приводит к тому, что среднемассовая температура используется только для визуального текущего контроля режима термоупрочнения, управление же осуществляется вручную.

Существуют варианты контроля температуры термоупрочненного проката за установкой принудительного охлаждения - до холодильника. Такое размещение пирометра позволяет оценить равномерность охлаждения проката по его длине. Однако, в этом случае выравнивание температуры проката, как правило, не завершено, и температура поверхности зависит не только от среднемассовой температуры, но и от расстояния пирометра до последней секции охлаждения, скорости прокатки, температуры охлаждающей воды и от других факторов. То есть, в этом случае соответствие между измеренной температурой и среднемассовой температурой весьма условно.

Требуемая среднемассовая температура определяется для каждого профилеразмера и класса механических свойств по химическому составу плавки прокатываемой стали опытным путем и корректируется по результатам механических испытаний. Для повышения оперативности прогнозирования механических свойств готового проката в ряде работ

предлагаются различные регрессионные зависимости [1,11,12-16]. Обращает на себя внимание как существенное различие коэффициентов регрессии при одноименных параметрах в правой части уравнений, так и вариации наборов переменных регрессий – до десяти [14]. Это свидетельствует о сильной зависимости полученных результатов от конкретной технологии термомеханической обработки арматурного проката, принятой на объекте исследования, и о влиянии фактора субъективности и состава средств контроля на выбор аргументов регрессионных зависимостей.

Во все регрессионные зависимости входят параметры, такие как скорость проката, давление и температура охлаждающей воды и т.п., непосредственно не входящие в (1), т.е. влияющие, фактически, на ту же среднемассовую температуру, которая уже и так входит в регрессионные зависимости. Поэтому обоснованность всех регрессионных зависимостей является ключевой задачей достоверности прогнозирования по ним механических свойств арматурного проката.

### Результаты исследований

Известно, что при термоупрочнении в прокате формируются два слоя с существенно различными структурами: поверхностный слой мартенсита (15% ч25% площади поперечного сечения проката [2,5]) и сердцевинный слой феррито-перлитной структуры. Соотношение площадей (толщин) в сечении данных слоев зависит как от диаметра проката, так и от схемы и параметров термоупрочнения.

Поскольку механизмы формирования данных слоев различны, то различны и их свойства, а также – зависимость этих свойств, как от среднемассовой температуры, так и от химического состава стали. Именно поэтому механические свойства проката зависят не только от среднемассовой температуры, но и от особенностей схемы охлаждения, так как она определяет соотношение площадей данных слоев в сечении проката.

В [17] предложено рассчитывать механические свойства арматурного проката на основе суперпозиции этих двух структурных составляющих.

Аналитические зависимости для расчета механических свойств данных слоев, в частности, временного сопротивления разрыву, предложены зависимости следующего вида:

$$\sigma_{в(п)} = a_{0(п)} + b_{0(п)} \cdot m_c + \frac{c_{0(п)} + c_{1(п)} \cdot m_c}{d_{0(п)} + d_{1(п)} \cdot m_c} \cdot (t_{A_1} - t_{см}) ; \quad (1)$$

$$\sigma_{в(м)} = a_{0(м)} + b_{0(м)} \cdot m_c + \frac{c_{0(м)} + c_{1(м)} \cdot m_c}{d_{0(м)} + d_{1(м)} \cdot m_c} \cdot (t_{A_1} - t_{отп\_экв}) ; \quad (2)$$

где  $m_c$  – массовая доля углерода в стали или углеродный эквивалент (%);  
 $t_{см}$  – среднемассовая температура проката (температура фазовых

превращений);  $t_{\text{отп\_экв}}$  – эквивалентная температура самоотпуска мартенсита;  $t_{A_1}$  – температура критической точки  $A_1$  (температура перлитных превращений). Там же приведены численные значения коэффициентов  $a_0, b_0, c_0, c_1, d_0, d_1$  (все коэффициенты положительны) (с индексами (п) для феррито-перлитной структурной составляющей и индексом (м) для мартенситной составляющей).

Порядок расчета эквивалентной температуры самоотпуска мартенсита по среднемассовой температуре приведен в [18].

Количество мартенсита (магнитной фазы) в сечении проката может быть проконтролировано электромагнитным методом непосредственно на выходе установки принудительного охлаждения [8,19]. Периодичность контроля составляет 200ч400мс, т.е. шаг контроля по длине проката – менее десяти метров. Это позволяет судить о равномерности охлаждения по длине проката, поскольку относительная площадь мартенситного слоя в сечении проката –  $s_m$ , связана с температурой проката и содержанием в нем углерода зависимостью [20]:

$$s_m \approx \frac{486 - t_{\text{пв}} - 477 \cdot m_c}{2 \cdot (t_{\text{см}} - t_{\text{пв}})}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{пв}}$  – температура поверхности проката на выходе установки термоупрочнения.

Использование электромагнитного контроля позволяет оценить область возможных значений механических свойств товарного проката, его среднемассовой температуры и содержание в нем углерода [21,22]. Минимальный период такой оценки соответствует периоду прокатки заготовок, полученных из одного слитка. Однако, по результатам контроля термоупрочнения и одной заготовки можно судить о равномерности термоупрочнения проката по его длине.

Это дает возможность реализовать автоматическое программное регулирование режима термоупрочнения для выравнивания механических свойств с коррекцией программы регулирования по результатам электромагнитного контроля каждой заготовки. Следует заметить, что неравномерность среднемассовой температуры по длине проката может быть вызвана неравномерностью нагрева заготовки в нагревательной печи, а повышенная неравномерность скорости движения прутка арматуры через охлаждающее устройство может быть связана с завышением коэффициентов обгона секций подводющего рольганга холодильника. Поэтому программное регулирование режима термоупрочнения должно сочетаться с автоматической идентификации данных ситуаций.

Перспективным направлением повышения стабильности механических свойств арматурного проката является построение управления на основе сочетания электромагнитного контроля с контролем среднемассовой температуры проката

Для обоснования методики такого управления процессом термоупрочнения перепишем уравнения (1,3) в сокращенном виде в приращениях к базовому режиму термоупрочнения:

$$\Delta\sigma_B = a_c \cdot \Delta m_c - a_{cm} \cdot \Delta t_{cm}, \quad (4)$$

$$\Delta s_M = -b_{пв} \cdot \Delta t_{пв} - b_{cm} \cdot \Delta t_{cm} - b_c \cdot \Delta m_c; \quad (5)$$

где  $a_c$ ,  $a_{cm}$ ,  $b_{пв}$ ,  $b_{cm}$ ,  $b_c$  – неотрицательные коэффициенты при соответствующих параметрах.

Исключая  $\Delta m_c$  из уравнений (4,5), получаем:

$$\Delta\sigma_B = -\frac{b_{пв}}{b_c} \cdot a_c \cdot \Delta t_{пв} - \frac{a_c}{b_c} \cdot \Delta s_M - \left( a_{cm} + a_c \cdot \frac{b_{cm}}{b_c} \right) \cdot \Delta t_{cm}. \quad (6)$$

Для того, чтобы текущее временное сопротивление разрыву соответствовало базовому значению, необходимо обеспечить  $\Delta\sigma_B = 0$ . Тогда из (5) следует соотношение:

$$\frac{\Delta s_M}{\Delta t_{cm}} = -b_{пв} \cdot \frac{\Delta t_{пв}}{\Delta t_{cm}} - \left( a_{cm} + a_c \cdot \frac{b_{cm}}{b_c} \right). \quad (7)$$

Численно оценить величины из правой части (7) можно, подставив численные значения соответствующих коэффициентов, приведенных в [21]:

– при  $s_{M(б)} = 0,15$  ( $t_{пв(б)} \approx 300^0\text{C}$ ):

$$\frac{\Delta s_M}{\Delta t_{cm}} = -0,0012 \cdot \frac{\Delta t_{пв}}{\Delta t_{cm}} - 5,25 \approx -5,25; \quad (8)$$

– при  $s_{M(б)} = 0,25$  ( $t_{пв(б)} \approx 170^0\text{C}$ ):

$$\frac{\Delta s_M}{\Delta t_{cm}} = -0,00057 \cdot \frac{\Delta t_{пв}}{\Delta t_{cm}} - 3,54 \approx -3,54. \quad (9)$$

Слагаемым в правой части (8,9), содержащим отношение  $\frac{\Delta t_{пв}}{\Delta t_{cm}}$ , можно

пренебречь, поскольку отклонение от базового режима термоупрочнения приводит к большему отклонению среднемассовой температуры проката на выходе линии термоупрочнения, чем температуры его поверхности [23].

Следовательно, методика настройки процесса термоупрочнения по количеству магнитной фазы в прокате на выходе линии термоупрочнения и по температуре самоотпуска проката заключается в корректировке процесса при отклонении количества магнитной фазы в прокате либо температуры самоотпуска от базовых значений для каждого из профила размеров таким образом, чтобы выдерживалось соотношение

$$\frac{\Delta s_M}{\Delta t_{cm}} = -R_{пв} = const, \quad (10)$$

где  $R_{пв}$  – константа, определяемая экспериментальным путем для каждого профила размера и базового режима термоупрочнения.

В связи с большим запаздыванием контроля температуры самоотпуска и сложности в соотнесения сечений контроля количества магнитной фазы в прокате и его температуры, целесообразно об изменении среднемассовой температуры проката судить по температуре частично «отогретой» поверхности – контролируемой на некотором удалении от выхода установки термоупрочнения. Это требует использование соответствующих моделей теплофизических процессов в термоупрочняемом прокате.

#### Выводы

Повышение точности управления режимом термоупрочнения арматурного проката достигается контролем двух основных параметров – среднемассовой температуры проката и количества магнитной фазы (мартенсита) на выходе установки термоупрочнения.

Методика настройки процесса термоупрочнения по количеству магнитной фазы в прокате на выходе линии термоупрочнения и по температуре самоотпуска проката заключается в корректировке процесса при отклонении количества магнитной фазы в прокате либо температуры самоотпуска от базовых значений таким образом, чтобы отношения отклонений данных величин были постоянными и равными определенной величине.

Для повышения оперативности (быстродействия) управления целесообразно проводить расчет среднемассовой температуры проката по результатам измерения температуры поверхности проката на некотором удалении от выхода установки термоупрочнения с использованием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Высокопрочная арматурная сталь. / Кугушин А.Л., Узлов И.Г., Калмыков В.В., Мадатян С.А., Ивченко А.В. М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
2. Научные и технологические основы производства арматурных сталей нового поколения / Вихлевщук В.А., Дубина О.В., Поляков В.А., Сокуренок А.В. и др. – К.: Наукова думка, 2001. – 158 с.
3. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. – М.: Воентехлит. – 2000. – 256 с.
4. Термическое упрочнение проката / Стародубов К.Ф., Узлов И.Г., Савенков В.Я. и др. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
5. Малокремнистые арматурные стали повышенной прочности / Вихлевщук В.А., Омесь Н.М., Нечепоренко В.А. и др. – К.: Наукова думка, 1999. – 151 с.
6. Разработка и освоение технологии разлива спокойной стали в изложницы, уширенные к низу, с применением теплоизоляционных плит для утепления головной части слитка / Крупман Л.И., Синяговский Б.П., Петик А.С. и др. // Разливка стали в слитках и их качество.: Тематич. отраслевой сб. №1 Мин-ва черной металлургии СССР. – М.: Металлургия, 1972. – С. 3-7.
7. Теория и практика прокатки малокремнистых арматурных сталей / Вихлевщук В.А., Дубина О.В., Ноговицын А.В. и др. – К.: Наукова думка, 2001. – 139 с.
8. Электромагнитный контроль процесса термоупрочнения проката крупных сечений / В.А. Шеремет, М.А. Бабенко, А.В. Кекух и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – №6. – С.102-105.
9. Арматурный прокат для железобетонных конструкций. Справочник-каталог / Дубина О.В., Худик Ю.Т., Большаков В.И. и др. – Днепропетровск: НИИИММ, 2000. – 88с.

10. Узлов И.Г., Савенков В.Я., Поляков С.Н. Термическая обработка проката. – К.: Техніка, 1981. – 159 с.
11. Управление процессом термического упрочнения арматурной стали в потоке прокатного стана / Сацкий В.А., Худик Ю.Т., Кузьменко Л.А. и др. // Сталь. – 1977. – №1. – С.75-77.
12. Совершенствование процесса термоупрочнения арматурного проката / Богданов Н.А., Сычков А.Б., Ласков В.П. и др. // Сталь. – 1992. – №5. – С.65-69.
13. Автоматизированная система управления механическими свойствами термоупрочненного проката / Егоров А.П., Ткачев В.С., Богданов Н.А., Лебедева Т.Л. // Применение вычислительной техники в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1989. – С.77-79.
14. Анализ термического упрочнения арматурной стали методами математической статистики / Худик Ю.Т., Федоренко В.К., Савенков В.Я. и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1971. – №1. – С.36-38.
15. Производство арматурной стали при использовании трассы термоупрочнения с пониженным давлением воды / Дьяченко Ю.В., Тимофеев В.С., Закшевский В.Б. и др. // Сталь. – 1998. – №11. – С.52-54.
16. Производство высокопрочной арматурной стали / Узлов И.Г., Худик Ю.Т., Ивченко А.В. и др. // Черная металлургия. – 1986. Вып.1(1005). – С.18-31.
17. Прогнозирование временного сопротивления разрыву малоуглеродистой низколегированной стали на основе системы частных регрессионных моделей / В.Н. Куваев, В.А. Чигринский, В.Г. Раздобреев, Д.А. Иванов // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. науч. тр-ов Института черной металлургии НАН Украины./ Вып.9. – К.: Наукова думка, 2004. – С.183-190.
18. К вопросу взаимосвязи температур отпуска и самоотпуска термически упрочненного арматурного проката / В.А. Шеремет, А.В. Кекух, В.Н. Куваев и др.// Теория и практика металлургии. – 2006. – №1-2 (50-51). – С.123-126.
19. Контроль процесса термомеханической обработки арматурной стали в потоке мелкосортного стана / В.А. Чигринский В.А., В.А. Пирогов, В.Н. Куваев и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – №6. – С.42-44.
20. Куваев В.Н. Зависимость магнитной фазы в прокате от условий термоупрочнения и содержания углерода в стали // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – №6. – С.92-95.
21. Куваев В.Н., Чигринский В.А., Иванов Д.А. Методологические основы контроля режима термоупрочнения арматурного проката электромагнитным методом // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2005. – Вип..75 – С.109-114.
22. Куваев В.Н., Иванов Д.А., Чигринский В.А. Взаимосвязь статистических характеристик температуры самоотпуска и содержания углерода в стали арматурного проката с результатами электромагнитного контроля процесса его термоупрочнения // Теория и практика металлургии. – 2008. – №5-6 (66-67 ). – С.86-89.
23. Куваев В.Н., Иванов Д.А., Чигринский В.А. Исследование влияния технологических факторов на взаимосвязь количества магнитной фазы в прокате со среднемассовой температурой проката на выходе установки термоупрочнения // Теория и практика металлургии. – 2007. – №2-3 (57-58). – С.92-97.