

*В.Н. Куваев, канд. техн. наук, В.А. Чигринский, канд. техн. наук,*

*Д.А. Иванов*

*(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)*

## **МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТРОЛЯ РЕЖИМА ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ АРМАТУРНОГО ПРОКАТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МЕТОДОМ**

Для получения требуемых механических свойств арматурного проката на отечественных станах широко и повсеместно используется режим его термоупрочнения с прокатного нагрева.

Контроль механических свойств готового арматурного проката регламентируется стандартами и предусматривает проведение выборочных механических испытаний готовой продукции со статистической обработкой полученных результатов [1, 2].

На практике партия проката, которая приходится на одну пробу, составляет, примерно, пятьдесят-семьдесят тонн, т.е. около одной вагонной нормы отгрузки проката, поэтому статистическая достоверность результатов механических испытаний для небольших партий арматурного проката имеет низкую доверительную вероятность. Вот почему возможно выпадение механических свойств отдельных партий проката из нормированных стандартами граничных значений, связанных с изменениями условий протекания технологического процесса,

Оперативный контроль процесса термоупрочнения необходим и при его настройке, что позволяет сократить простои в ожидании результатов механических испытаний.

Исследования, приведенные в работах [3-5], показывают, что оперативная оценка результатов термоупрочнения сводится к оценке температуры проката на выходе из установки и долевого содержания углерода в стали.

Естественным решением представляется контроль температуры проката пирометрами, а долевого содержания углерода в стали принимать априори по данным плавочного химического состава прокатываемой стали.

Однако следует учитывать, что для разных слитков отклонения содержания углерода находятся в пределах от 0,02% до 0,11% среднего (плавочного) значения [6, 7]. Это вносит существенные погрешности в оценку механических свойств при прокатке заготовок из стали, разлитой в изложницы. Существуют также технические сложности и с контролем температуры самоотпуска, связанные с размещением и визированием пирометров на прокат непосредственно после ее выравнивания по сечению проката – на холодильниках мелкосортных станов.

В работах [4, 8] предлагается оценивать механические свойства проката по его магнитным свойствам на выходе установки термоупрочнения и плавочному содержанию углерода в стали. Бесспорным преимуществом электромагнитного контроля является высокая частота проведения измерений, что позво-

ляет оценить изменение свойств по длине проката, и устойчивость первичных датчиков к тяжелым условиям эксплуатации. Недостаток – существенное влияние неконтролируемых параметров на результаты контроля, что приводит к неоднозначности взаимосвязи магнитных свойств проката на выходе установки термоупрочнения с механическими свойствами готовой продукции [9].

Это требует обоснования методологии контроля процесса термоупрочнения электромагнитным методом, которую целесообразно проводить на примере временного сопротивления разрыву, так как практика показывает, что при прочностных параметрах проката, близких к нижней границе нормируемой стандартом, всегда обеспечиваются требуемые пластические свойства, а нормирование последних фактически может рассматриваться как ограничение прочностных свойств сверху.

Аналитические зависимости временного сопротивления разрыву малоуглеродистых низколегированных сталей и относительного количества магнитной фазы на выходе установки термоупрочнения от массовой доли углерода в стали, среднемассовой температуры и температуры поверхности проката на выходе установки термоупрочнения получены в работах [9, 10]:

$$\sigma_B = 330 + 800m_c + \frac{370 + 2400m_c}{323 + 500m_c} \cdot (723 - t_{cm}), \text{ Н/мм}^2; \quad (1)$$

$$s_M \approx \frac{486 - t_{пв} - 477m_c}{2 \cdot (t_{cm} - t_{пв})}, \quad (2)$$

где:  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрыву, Н/мм<sup>2</sup>;  $s_M$  – относительное количество магнитной фазы в прокате на выходе установки термоупрочнения;  $m_c$  – массовая доля углерода в стали, %;  $t_{cm}$  – среднемассовая температура проката на выходе установки термоупрочнения, °С,  $t_{пв}$  – среднемассовая температура и температура поверхности проката на выходе установки термоупрочнения, °С.

Для небольших отклонений аргументов уравнений (1), (2) от базовых значений может быть принята линейная зависимость величины отклонения временного сопротивления разрыву и относительного количества магнитной фазы от значения, соответствующего базовым значениям аргументов.

Тогда, разложив уравнения (1), (2) в ряд Тейлора, ограничившись членами не выше первой степени, имеем:

$$\Delta\sigma_B = \left( 800 + \frac{(723 - t_{cm(б)})}{323 + 500m_{c(б)}} \left( 2400 - \frac{370 + 2400m_{c(б)}}{0,646 + m_{c(б)}} \right) \right) \Delta m_c - \frac{370 + 2400m_{c(б)}}{323 + 500m_{c(б)}} \Delta t_{cm}; \quad (3)$$

$$\Delta s_M = -\frac{1}{2(t_{cm(\bar{b})} - t_{пв(\bar{b})})} \cdot \left( 1 - \frac{486 - t_{пв(\bar{b})} - 477m_{c(\bar{b})}}{(t_{cm(\bar{b})} - t_{пв(\bar{b})})} \right) \Delta t_{пв} - \frac{486 - t_{пв(\bar{b})} - 477m_{c(\bar{b})}}{2(t_{cm(\bar{b})} - t_{пв(\bar{b})})^2} \Delta t_{cm} - \frac{477}{2 \cdot (t_{cm(\bar{b})} - t_{пв(\bar{b})})} \Delta m_c . \quad (4)$$

Аргументы базового режима целесообразно находить от обратного – задавшись параметрами, значения которых можно оценить по экспериментальным данным, в частности, ориентируясь на их значения, получаемые при массовом промышленном производстве арматурного проката. Тогда по данным работ [6,7,10,11], для режимов термоупрочнения проката класса А500С – наиболее массового вида арматурного проката, производимого на ОАО «Криворожсталь», можно принять  $\sigma_{в(\bar{b})}=700$  Н/мм<sup>2</sup>,  $m_{c(\bar{b})}=0,2\%$ . Относительное же количество магнитной фазы в прокате на выходе установки термоупрочнения – относительная площадь мартенситного поверхностного слоя, зависит от схемы конфигурации линии ускоренного охлаждения, профилера размера термоупрочняемого проката и находится в пределах  $s_{M(\bar{b})}=0,15 \dots 0,25$ . Из выражения (1) получаем, что базовым значениям  $\sigma_{в(\bar{b})}$ ,  $m_{c(\bar{b})}$  соответствует  $t_{cm(\bar{b})} \approx 600$  °С, а из выражения (2) для  $\sigma_{в(\bar{b})}$ ,  $m_{c(\bar{b})}$ ,  $t_{cm(\bar{b})}$  и  $s_{M(\bar{b})}=0,15$  находим, что  $t_{пв(\bar{b})} \approx 300$  °С, для  $s_{M(\bar{b})}=0,25$  –  $t_{пв(\bar{b})} \approx 170$  °С.

Весовой вклад каждого из параметров можно оценить, подставив в уравнения (3),(4) принятый базовый режим.

Тогда:

$$\sigma_{в} = 700 + 1200\Delta m_c - 2,25\Delta t_{cm} , \text{ Н/мм}^2 \quad (5)$$

а  $s_M$  при  $s_{M(\bar{b})}=0,15$  ( $t_{пв(\bar{b})} \approx 300$  °С)

$$s_M = 0,15 - 0,0012\Delta t_{пв} - 0,0005\Delta t_{cm} - 0,795\Delta m_c , \quad (6)$$

если же  $s_{M(\bar{b})}=0,25$  ( $t_{пв(\bar{b})} \approx 170$  °С), то

$$s_M = 0,25 - 0,00057\Delta t_{пв} - 0,00059\Delta t_{cm} - 0,55\Delta m_c ; \quad (7)$$

Как видно из выражений (5)-(7), коэффициенты при параметрах  $\Delta t_{cm}$  и  $\Delta m_c$  в зависимости для временного сопротивления разрыву имеют разные знаки, а в зависимости для относительной величины – одинаковые. А это означает, что если хотя бы один из этих параметров неизвестен, то достоверная корреляционная зависимость  $\sigma_{в}$  от  $s_M$  не может быть получена.

Иными словами, методика контроля процесса термоупрочнения арматурного проката электромагнитным методом не может быть основана на корреляционной зависимости  $\sigma_{в} = f(s_M)$ .

Очевидным выходом из данного противоречия является использование в зависимостях (1), (2) данных о плавочном содержании углерода в стали. Однако из-за неравномерного содержания углерода по высоте слитка эти данные для каждой конкретной заготовки являются приближенными. Тем не менее, возможные отклонения фактического химического состава конкретной заготовки, в частности, долевого содержания углерода в стали  $m_{c(з)}$ , от плавочного ( $m_{c(п)}$ ) ограничены как снизу, так и сверху, т.е.  $\Delta m_{c(п)min} < m_{c(з)} - m_{c(п)} < \Delta m_{c(п)max}$  либо  $m_{c(п)min} < m_{c(з)} < m_{c(п)max}$ .

С другой стороны, временное сопротивление разрыву должно находиться в определенных границах, т.е.  $\sigma_{в(min)} \leq \sigma_{в} \leq \sigma_{в(max)}$ . Поэтому, если известно минимально и максимально возможное доленое содержание углерода в стали, то из уравнения (1) можно найти и допустимые отклонения среднемассовой температуры проката от базовой величины  $\Delta t_{см(п)min}$  и  $\Delta t_{см(п)max}$ .

Тогда, из выражения (2) могут быть определены и граничные отклонения  $\Delta s_{м(п)min} = f(\Delta t_{см(п)max}; \Delta m_{c(п)max})$  и  $\Delta s_{м(п)max} = f(\Delta t_{см(п)min}; \Delta m_{c(п)min})$ .

Таким образом, контроль процесса термоупрочнения электромагнитным методом заключается в наблюдении за показаниями прибора – индикатора магнитной фазы, которые не должны выходить за определенные граничные значения.

Поскольку установки термоупрочнения большинства отечественных станов не оборудованы устройствами для автоматического управления режимом ускоренного охлаждения проката, то практический интерес представляет методика настройки режима термоупрочнения, позволяющая получить требуемые мехсвойства при производстве проката из стали различных плавок, имеющих вариации химсостава в пределах, допустимых для данной марки стали. В этом случае мы должны исходить из того, что химический состав, в частности, массовая доля углерода в стали, любой заготовки должна соответствовать марочному составу стали заготовки, т.е.  $m_{c(м)min} < m_{c(з)} < m_{c(м)max}$ .

Оценим возможность практической реализации такого подхода на, например, на стане МС 250-5 ОАО «Криворожсталь».

Арматурный прокат на стане производят из стали марок 25Г2Схр, 3ТРпс, 3ГТРпс, марочная массовая доля углерода в стали лежит в пределах: для стали 25Г2Схр – от 0,2% до 0,25%; для стали 3ТРпс и 3ГТРпс – от 0,17% до 0,22% [12].

Тогда, для получения значения временного сопротивления разрыву в пределах, оговоренных стандартом Украины на арматурный прокат среднемассовая температура проката при его производстве из стали 25Г2Схр должна находиться в пределах 550÷665 °С, а из стали 3ТРпс и 3ГТРпс – в пределах 535÷650 °С.

Относительное количество магнитной фазы в прокате на выходе установки термоупрочнения может быть рассчитано по формуле (2). Результаты расчета для температур поверхности проката 300 °С и 170 °С приведены на рис.1.

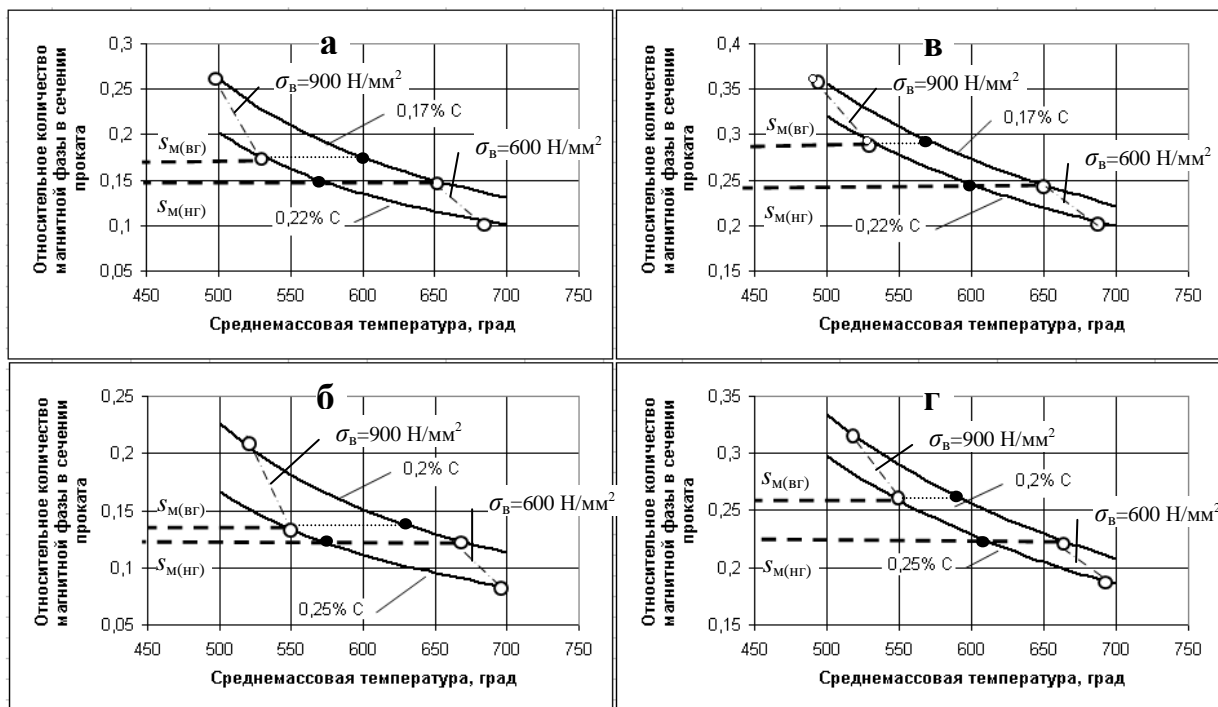


Рис.1 Расчетные зависимости относительного количества магнитной фазы в прокате от среднемассовой температуры проката на выходе установки термоупрочнения для сталей с массовой долей углерода  $0,17 \div 0,22$  (а,в) и  $0,20 \div 0,25$  (б,г) при температуре поверхности проката  $300^{\circ}\text{C}$  (а,б) и  $170^{\circ}\text{C}$  (в,г).

Очевидно, что если относительное количество магнитной фазы лежит между нижней ( $s_{(HF)}$ ) и верхней ( $s_{(BF)}$ ) рабочей границей, то временное сопротивление разрыву будет соответствовать требованиям стандарта для арматурного проката класса А500С.

Таким образом, в основу методики контроля процесса термоупрочнения электромагнитным методом должно быть положено определение граничных значений показаний индикатора магнитной фазы, при которых временное сопротивление разрыву проката находится в требуемом диапазоне.

По рис.1 легко проиллюстрировать правило, которое может быть положено в методику использования электромагнитного метода при настройке процесса термоупрочнения – если настройка процесса термоупрочнения производится на плавке с минимальной, для данной марки стали, массовой долей углерода, то режим можно считать выбранным правильно, если показания индикатора магнитной фазы близки к верхней границе. И наоборот – если настройка процесса термоупрочнения производится на плавки с максимальной, для данной марки стали, массовой долей углерода, то режим можно считать выбранным правильно, если показания индикатора магнитной фазы близки к нижней границе. На рис.1 эти показания отмечены черными точками.

Поскольку математическое ожидание генеральной совокупности массовой доли углерода в заготовках одной плавки должно соответствовать плавочной массовой доле углерода –  $M[m_{c(3)}] = m_{c(n)}$ , то настройку режима термоупрочне-

ния для заготовок данной плавки можно вести исходя из критерия  $M[s_m] = s_{m(б)}$ , что должно обеспечить  $M[\sigma_b] = \sigma_{m(б)}$ .

При данном подходе имеется возможность оценить неравномерность механических свойств по длине заготовке – по разнице между максимальным и минимальным значениями показаний прибора электромагнитного контроля на одной заготовке, и колебаний механических свойств заготовок одной плавки по разбросу математических ожиданий показаний для разных заготовках плавки.

### Список литературы

1. Арматурный прокат для железобетонных конструкций. Справочник-каталог / О.В. Дубина, Ю.Т. Худик, В.И. Большаков и др. – Днепропетровск, НИИИММ, 2000. – 88 с.
2. ДСТУ 3760-98. Прокат арматурный для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. – К.: Дежстандарт України, 1998. – 20с.
3. Термическое упрочнение проката / К.Ф. Стародубов, И.Г. Узлов, В.Я. Савенков и др. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
4. Управляемое термическое упрочнение проката / И.Г. Узлов, В.В. Парусов, Р.В. Гвоздев, О.В. Филонов – К.: Техніка, 1989. – 118с.
5. Высокопрочная арматурная сталь./А.Л. Кугушин, И.Г. Узлов, В.В. Калмыков, С.А. Мадатян, А.В. Ивченко // М.: Металлургия, 1986, с.272.
6. Малокремнистые арматурные стали повышенной прочности / В.А. Вихлевщук, Н.М. Омесь, В.А. Нечепоренко и др. – К.: Наукова думка, 1999. – 151 с.
7. Теория и практика прокатки малоуглеродистых арматурных сталей. / В.А. Вихлевщук, О.В. Дубина, А.В. Ноговицын, В.А. Сацкий и др. – К.: Наукова думка, 2001. – 139 с.
8. Зависимость между магнитными и механическими свойствами термически упрочненной арматурной стали / Г.С. Диниц, О.Н. Кукушкин, А.Г. Лисняк, В.И. Лошкарев, В.А. Пирогов // В сб. науч. тр-ов Ин-та черной металлургии НАН Украины: «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии» // К.: Наукова думка, 1995, С.203-206.
9. 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.
10. 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 им. З.И. Некрасова./ Вып.9. – К.: Наукова думка, 2004. – С.183-190.
11. Шеремет В.А. Научные основы продольно разделенной арматуры. / Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук – спец.05.16.01 – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия, 2003. – 18с.
12. Электромагнитный контроль процесса термоупрочнения проката крупных сечений / В.А. Шеремет, М.А. Бабенко, А.В. Кекух, М.И. Костюченко, А.Н. Кокшаров, Г.А. Кузнецов, В.Н. Куваев, В.А. Чигринский, Д.А. Иванов, Ю.П. Карпинский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – №6. – С.102-105.