

Г.В.Левченко, С.А.Воробей, А.В.Ноговицын, И.А.Гуныкин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЕРМОУПРОЧНЕННОЙ АРМАТУРНОЙ СТАЛИ

Институт черной металлургии НАН Украины

Уточнены математические модели формирования микроструктуры и механических свойств стержневого проката в условиях процесса термоупрочнения в потоке прокатного стана. Показана возможность применения разработанных моделей для оптимизации химического состава стали и снижения разброса значений механических свойств арматурного термоупрочненного проката.

Начиная с 80-х годов при разработке стандартов на металлопрокат все большее внимание уделяется обеспечению показателей его качества при снижении требований к химическому составу стали и технологии производства. В частности, введение ДСТУ 3760–98 на арматурный прокат изменило подход к выбору марок стали для обеспечения требований различных классов. Если в ГОСТ 5781–82 для каждого класса прочности указывались конкретные марки стали, то в ДСТУ 3760–98 ограничивается только максимальное содержание химических элементов. В частности для классов А240С – А400С из основных упрочняющих элементов (углерод, марганец, кремний) ограничивается только содержание углерода (не более 0,22%). Одновременно для обеспечения свариваемости предъявляются требования к углеродному эквиваленту (0,30–0,52%). Такое положение позволяет производителю самому выбирать химический состав стали и технологию производства. Появилась возможность более широко использовать термоупрочнение проката в потоке станов с одновременным снижением содержания легирующих элементов в стали вплоть до применения углеродистых сталей марок Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс. Задачу выбора рационального химического состава стали и параметров технологии производства, обеспечивающих требования действующих стандартов, можно решать несколькими путями. Наиболее часто эту задачу решают на основе накопленного производственного опыта. Однако в последние годы все большее распространение находят методы математического моделирования, которые позволяют без проведения экспериментальных исследований определять оптимальное содержание химических элементов в стали и рациональные технологические параметры прокатки [1]. Кроме того, такой подход рационально использовать для обеспечения требований потребителей, отличных от предусмотренных стандартами, а также для стабилизации показателей качества проката.

На процесс формирования структуры и механических свойств арматурного термоупрочненного проката наряду с содержанием химических элементов в стали важнейшее влияние оказывают параметры последеформационного охлаждения, комплексным показателем которого является температура самоотпуска [2]. На необходимость корректировки температуры самоотпуска в зависимости от химического состава стали указывали многие исследователи. Одной из первых работ, в которой разработаны конкретные рекомендации такого регулирования была выполнена сотрудниками Института черной металлургии совместно с Криворожским металлургическим заводом в 1976–1977 г.г. [3]. Авторы на основе статистических методов разработали номограмму для определения рациональной температуры самоотпуска в зависимости от содержания углерода в стали марки 20ГС2 и требуемых значений предела текучести, прочности и относительного удлинения. Такой подход правомерен, однако он обладает целым рядом недостатков, присущих статистическим методам. В частности, в производственных условиях, как правило, нарушается принцип независимости анализируемых параметров, что приводит к искажению влияния каждого отдельно взятого параметра. Кроме того, статистические методы неприменимы при значениях исходных параметров, выходящих за пределы выборки. Например, их невозможно использовать при разработке технологии производства новых марок стали.

В Институте черной металлургии был разработан комплекс математических моделей формирования микроструктуры и прочностных свойств проката, в том числе арматурного [1, 4, 5]. Модель основана на прогнозировании микроструктуры стали в зависимости от фазовых превращений при различных схемах охлаждения проката. Предварительно рассчитывается изменение температуры по сечению проката (с заданным шагом по радиусу) начиная от температуры конца прокатки и заканчивая температурами, при которых уже не происходят фазовые изменения в стали. Прочностные свойства рассчитываются для каждого слоя по сечению проката в зависимости от характеристик структуры: соотношения фаз (феррита, перлита, бейнита, мартенсита), размера зерен феррита, межпластинчатого расстояния перлита и пр. и химического состава. Затем определяются среднеинтегральные прочностные свойства проката в целом [5]. Недостатком разработанных моделей является низкая точность прогнозирования пластических свойств (относительного удлинения), что значительно снижает достоверность оценки качества проката.

В связи с этим, целью настоящей работы являлось уточнение расчета относительного удлинения металла и оценка возможности применения математических моделей для прогнозирования и стабилизации структуры и свойств термоупрочненного проката.

Методика расчета относительного удлинения (δ_5) разработана на основе анализа большого количества экспериментальных данных по химическому составу и механических свойств проката (листового и стержневого, в том числе термоупрочненного). Величина удлинения рассчитывается в зависимости от предела прочности проката и химического состава стали. При этом было учтено следующее. Изменение содержания марганца от 0,30 до 1,80 %, увеличивая предел прочности, практически пропорционально снижает относительное удлинение. Увеличение содержания кремния до 2% также увеличивает предел прочности, однако относительное удлинение при этом изменяется незначительно. Влияние углерода носит экстремальный характер. В диапазоне содержания углерода 0,25 – 0,35 % наблюдается наиболее благоприятное соотношение прочностных и пластических свойств. Установленные зависимости по влиянию углерода, марганца и кремния на соотношение прочностных и пластических свойств хорошо коррелируется с опубликованными экспериментальными данными других исследователей (например, [2]).

Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило определить следующий возможный диапазон применения разработанных моделей. Содержание в стали основных элементов: углерода 0,05–0,50%, марганца 0,03 – 1,80%, кремния 0,01 – 2,00%, хрома 0,02 – 1,80%. Диаметр проката 10–32 мм. Температура конца прокатки 850–1100 °С. Температура самоотпуска 350–700 °С (или горячекатаное состояние).

В качестве примера на рис.1 показаны расчетные и экспериментальные данные механических свойств арматурного проката диаметром 16 мм из стали марки 25Г2С (углерод 0,26%, марганец 1,05%, кремний 0,39%).

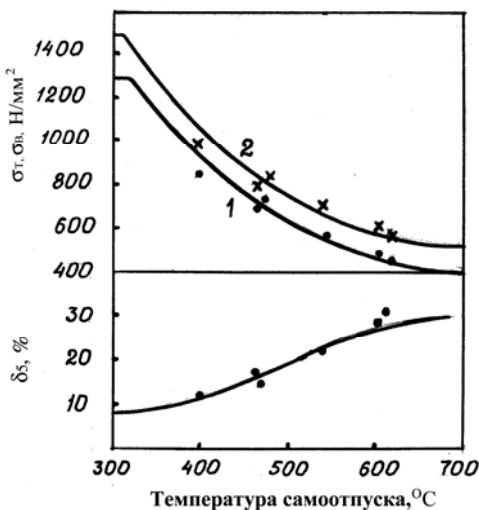


Рис.1. Изменение механических свойств арматурного проката в зависимости от температуры самоотпуска. Линии — расчетные значения, точки — экспериментальные.

1 — предел текучести, 2 — предел прочности

Комплекс разработанных математических моделей позволяет решать ряд практических задач. В частности, был определен рациональный химический состав периодического проката для анкерного крепления горных выработок. Определение проводили одновременно двумя методами – на основе анализа экспериментальных (в том числе известных из литературы) данных [6] и методом математического моделирования. Требования к механическим свойствам этого проката приведены в таблице 1 [7].

Таблица 1. Механические свойства проката для анкерной крепи (не менее)

Уровень несущей способности крепи	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %
Обычный	400	500	20
Повышенный	500	650	20
Особо высокий	600	800	20

Расчеты проводили в следующем диапазоне варьирования химического состава стали (%): углерод 0,2–0,4; марганец 0,6–1,4; кремний 0,04 – 1,0. Диапазон варьирования температуры самоотпуска составил 500–700°C. При различном сочетании указанных параметров рассчитывали значения предела текучести (σ_T), предела прочности (σ_B) и относительного удлинения (δ_5) для проката диаметром 22–28 мм. Некоторые результаты расчетов приведены на рис.2.

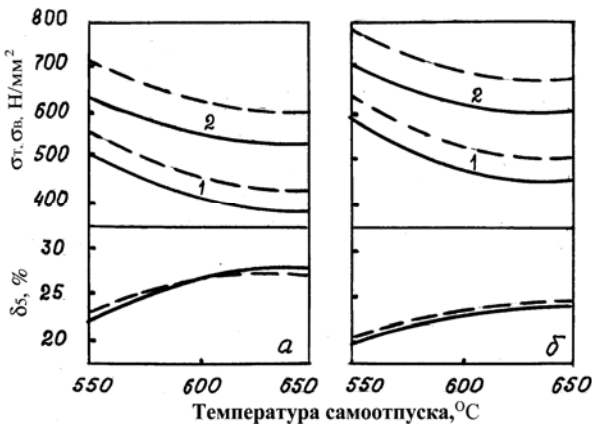


Рис.2. Расчетные значения механических свойств проката диаметром 22 мм при содержании в стали углерода 0,3%. Содержание марганца 0,6% (а) и 1,4% (б). Содержание кремния 0,04% (сплошные линии) и 1% (пунктирные линии). 1 – предел текучести, 2 – предел прочности

Из рассчитанного массива данных выбирали те значения содержания химических элементов и температур самоотпуска, при которых гарантированно обеспечивается требуемый комплекс прочностных и пластических свойств (табл.1). Полученные результаты показали следующее. Обычный уровень несущей

способности анкерной крепи можно обеспечить практически во всем исследованном интервале значений углерода, марганца и кремния при соответствующей корректировке температуры самоотпуска проката. Исключение составляет область с максимальным содержанием углерода и марганца ($C \geq 0,37 \%$ при $Mn \geq 1,2 \%$), характеризующаяся низкой пластичностью.

Повышенный уровень несущей способности анкерной крепи обеспечивается при сочетании содержания химических элементов, приведенном в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав стали, обеспечивающий повышенный уровень несущей способности анкерной крепи.

C, %	Mn, %	Si, %
0,2	1,0–1,4	0,5–1,0
0,3	0,6–1,4	0,5–1,0
0,4	0,6–1,0	0,5–1,0

Оптимальную область содержания химических элементов в стали определяли по двум признакам: наиболее высокое произведение предела текучести на относительное удлинение и наибольший допустимый диапазон изменения температуры самоотпуска. Исходя из этих соображений для повышенного уровня несущей способности анкерной крепи следует рекомендовать следующий химический состав стали (%): углерод 0,26 – 0,34, марганец 1,0–1,4, кремний 0,5 – 1,0. Проведенные экспериментальные исследования [6] подтвердили правильность выбора химического состава стали для данного вида проката. В результате были разработаны технические условия ТУ У 27.1–4–5567–2003 “Прокат для изготовления анкерного крепления горных выработок”, в соответствии с которыми прокат изготавливают из низколегированной стали, химический состав которой должен соответствовать следующим требованиям: углерод 0,25 – 0,35%, марганец 0,9–1,4%, кремний 0,6 – 0,95%.

Расчеты показали, что в случае необходимости производства проката для анкерной крепи особо высокого уровня несущей способности можно рекомендовать сталь со следующим содержанием химических элементов: углерод 0,27 – 0,33%, марганец 1,20 – 1,40%, кремний 1,80 – 2,0 %).

С использованием разработанных математических моделей была выполнена оценка влияния различных факторов на нестабильность механических свойств термоупрочненного проката. В производственных условиях диапазон колебаний прочностных свойств может достигать 100 – 200 Н/мм². На рис.3 показаны гистограммы распределения механических свойств термоупрочненного проката из сталей 25Г2С (а) и 35ГС (б), произведенного в течении одного года.

В объем каждой выборки включены данные для одного диаметра проката и одного класса прочности. Расчетным методом проанализировали возможное влияние колебаний различных параметров на разброс значений механических свойств проката (химического состава стали, скорости прокатки, температуры самоотпуска). Диапазон изменения содержания химических элементов в стали и скорости прокатки определяли по экспериментальным данным. Влияние изменения скорости движения хвостового участка проката после порезки, колебаний температуры, давления и расхода охлаждающей воды учитывали через изменение температуры самоотпуска по литературным данным [2, 3].

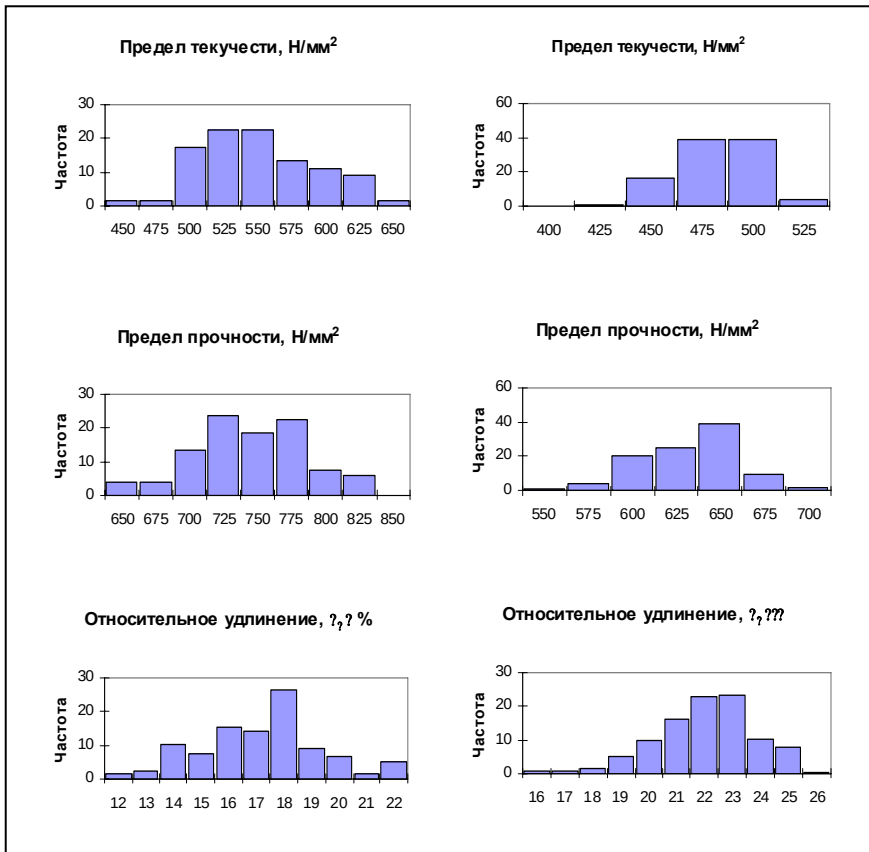


Рис.3. Гистограммы распределения механических свойств арматурного проката диаметром 25 мм из сталей 25Г2С (а) и 35ГС (б).

Затем рассчитывали влияние изменения температуры самоотпуска на механические свойства проката. Получены следующие результаты. Степень влияния колебаний химического состава стали на разброс механических свойств составляет 35–45% (в том числе только углерода, марганца и кремния 30–35%), колебаний скорости прокатки – 10–15%, колебаний режимов термоупрочнения – 45–55%. Таким образом, применение разработанных математических моделей для корректировки температуры самоотпуска только в зависимости от содержания в стали углерода, марганца и кремния позволит уменьшить разброс значений механических свойств примерно на 30%.

Выводы. Уточнены математические модели формирования микроструктуры и механических свойств стержневого проката в условиях процесса термоупрочнения в потоке прокатного стана. Показана возможность применения разработанных моделей для определения рационального химического состава стали в зависимости от требований, предъявляемых к механическим свойствам термоупрочненного проката. Расчетным путем установлено, что применение разработанных моделей для корректировки температур самоотпуска в зависимости от содержания в стали углерода, марганца и кремния позволит снизить разброс значений механических свойств арматурного термоупрочненного проката примерно на 30 %.

1. *Теория и практика прокатки малокремнистых арматурных сталей* / В.А.Вихлевшук, О.В.Дубина, А.В.Ноговицын и др. – К.: Наукова думка, 2001. – 140 с.
2. *Высокопрочная арматурная сталь* / А.А.Кугушин, И.Г.Узлов, В.В.Калмыков и др. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.
3. *Управление процессом термического упрочнения арматурной стали в потоке прокатного стана* / В.А.Сацкий, Ю.Т.Худик, Л.А.Кузьменко и др. // *Сталь*, 1977. – № 1. – С. 75–77.
4. *Оценка адекватности описания математической моделью процесса изменения зерна аустенита горячедеформированной стали* / А.В.Ноговицын, Г.В.Левченко, И.А.Вакуленко, А.В.Богачева // *Фундам. и прикл. пробл. черной металлургии*. К.: Наукова думка, 2001. – Вып. 4. – С.264–268.
5. *Исследование возможности прогнозирования с помощью математического моделирования прочностных свойств термически упрочненного стержневого проката* / А.В.Ноговицын, Г.В.Левченко, И.А.Вакуленко и др. // *Фундам. и прикл. пробл. черной металлургии*. К.: Наукова думка, 2002. – Вып. 5. – С.283–287.
6. *Термоупрочненный периодический прокат для анкерной крепи горных выработок* / Г.В.Левченко, А.В.Кекух, В.А.Поляков и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2003. – № 5. – С. 58–61.
7. *Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт* / *Ин-т геотехнической механики НАН Украины*. – Днепропетровск. – 2002. – 372 с.