

УДК 621.771.23:669.3

Трусов В. А.
Зиновьев А. В.
Зинкевич М. Б.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СХЕМ ОБРАБОТОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО СОСТОЯНИЯ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Специфика использования арматурной стали в железобетоне не позволяет возвращать затраченный металл в металлургический передел в виде металлолома. В связи с этим возникает необходимость производства «экономичных» видов стержневой арматуры, т. е. металлопрокат расширенного набора типоразмеров из углеродистых сталей с высоким комплексом механических свойств. Это позволяет снизить металлоемкость конструкций за счет замены арматурного проката одного класса прочности на высокопрочные профили другого класса меньшего диаметра.

Решение актуальных задач экономии за счет повышения качества сортовых профилей в первую очередь связано с разработкой или совершенствованием технологии производства и принципиально возможно при комплексном подходе, учитывающем многофакторные условия процесса деформации и термической обработки стали. Переход на экономичные виды металлопроката с заданным комплексом показателей качества с целью экономии металла диктует главное условие – повышение и стабилизация уровня механических свойств, в первую очередь прочностных, мелкосортных профилей.

Повышение прочностных характеристик проката массового потребления происходит по двум основным направлениям. Первое касается комплексного легирования или микролегирования сталей для формирования мелкозернистой структуры и механических свойств. Второе связано с упрочнением с отдельного нагрева или в потоке прокатных станов в процессе деформационно-термического производства проката (контролируемая прокатка, прерванная закалка с самоотпуском, термомеханическая обработка (ТМО)) как из малоуглеродистых, так и низко- и микролегированных сталей, обеспечивающих предел текучести 440 Н/мм² и более.

Из всех химических элементов, вводимых в сталь, углерод является главным компонентом, влияющим на механические свойства проката, а также определяющим и существенно ограничивающим важный показатель качества арматурных профилей, как свариваемость. Для гарантируемой свариваемости углеродистой стали величина углеродного эквивалента по ГОСТ 27772-88 ограничена 0,49 % (в отдельном случае 0,51 %) [1–3].

Целью данной работы является повышение комплекса механических свойств углеродистых сталей за счет использования различных способов их обработок.

Известно, что варьирование химического состава в пределах марочного для уменьшения величины углеродного эквивалента приводит к значительному изменению комплекса механических свойств. С целью более широкого охвата материалов для получения информации о формировании показателей качества сортового проката диаметром от 8 до 40 мм, произведенного в условиях станов 350 и 350/250 ОАО «Лиепаяс Металургс» (Латвия) за 6 лет, выполнен статистический анализ (среда MySQL) данных по уровню механических свойств горячекатаных (25Г2С, 35ГС) и термически упрочненных сталей (10Г2, Ст3Гпс, Ст3сп). Анализу подвергнуто около 110 тыс. позиций (записей).

Комплексное влияние концентрации с нижней до верхней границы углерода, марганца, кремния в пределах марочного в стали и температуры окончания ускоренного охлаждения оценивали по влиянию на механические свойства вышеуказанных размеров в арматурных профилях.

На рис. 1 приведены результаты, отражающие влияние марганца и кремния, в соответствии с ГОСТ 5781-82, на механические свойства горячекатаных арматурных профилей при различных концентрациях углерода.

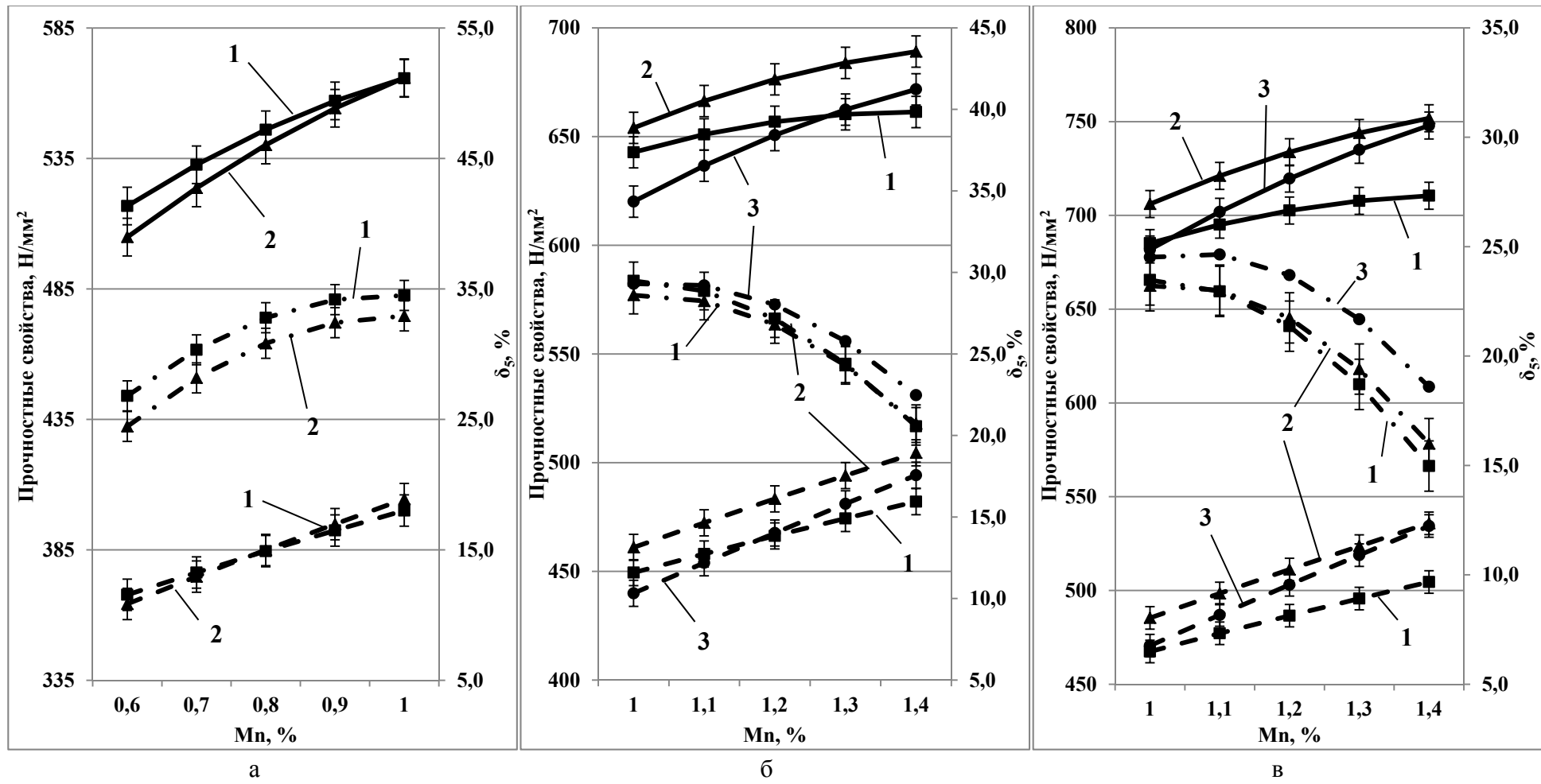


Рис. 1. Влияние марганца и кремния на механические свойства горячекатаных арматурных профилей:
 — σ_s ; --- σ_m ; -·- δ_5 ; а – 0,22 % С; б – 0,30 % С; в – 0,37 % С; 1 – 0,35 % Si; 2 – 0,55 % Si; 3 – 0,75 % Si

Из результатов исследования следует, что класс прочности А-I по ГОСТ 5781-82 достигается при любом химическом составе стали исследуемого диапазона. Требования класса прочности А-II при минимальном содержании углерода – 0,22 % в стали гарантировано достигаются при концентрации марганца не менее 0,65 % и кремния – 0,35 % (рис. 1–а). Значение временного сопротивления в 590 Н/мм², регламентируемого классом прочности А-III, при содержании углерода 0,22 % не было достигнуто на всем исследуемом диапазоне. При увеличении концентрации углерода в стали до 0,30 %, что соответствует нижнему пределу для стали марки 35ГС по ГОСТ 5781-82, и концентрации марганца и кремния не менее 1 % и 0,35 % соответственно (рис. 1–б) происходит переход в класс прочности А-III.

Для перехода в класс прочности А-IV легирование стали, содержащей 0,37 % углерода, марганцем и кремнием является недостаточным (см. рис. 1–в). При максимальной концентрации углерода в стали – 0,37 %, марганца – 1,4 % и кремния – 0,75 %, ни при каких условиях не достигаются требования к прочности для класса А-IV, а минимальное значение показателя пластичности отвечает требованиям только класса А-III [1].

Очевидно, что экономически наиболее рациональным способом достижения высокопрочного состояния стали является производство арматурных профилей с наименьшей долей легирующих элементов при совмещении двух способов упрочнения – пластической деформации и фазовых превращений путем варьирования температурно-временными параметрами охлаждения. При этом формирование структуры металла и его свойств происходит в условиях повышенной плотности и определенном распределении несовершенства кристаллической решетки, которые образовались при пластической деформации.

При производстве высокопрочной стали наиболее широкое применение имеет высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО). Наличие мелкого зерна аустенита и повышенной плотности дислокаций, имеющих ячеистую структуру, позволяет в результате ускоренного охлаждения получать повышенную пластичность и вязкость стали при достаточно высокой прочности [2].

Исследование технологических параметров производства свариваемой высокопрочной арматурной стали были проведены с целью достижения требуемых классом прочности А600С по СТО АСЧМ 7-93 механических характеристик проката из низкоуглеродистой стали марки СтЗсп. Для этого было реконструировано и установлено на стане экспериментальное устройство, где движение воды в камере охлаждения осуществляется поступательно-вращательным способом. Измерения температуры нагретого (T_0) от 800 до 1000 °С и ускоренно охлажденного ($T_{вых}$) металла проведены с использованием бесконтактного инфракрасного пирометра с погрешностью измерения температуры в пределах $\pm(0,01 \cdot t + 1)$ °С. Варьирование скоростью движения проката, а, следовательно, временем ($\tau_{охл}$) и скоростью ($V_{охл}$) охлаждения, в серии экспериментов, осуществляется изменением скорости подачи арматуры трайб-аппаратом. Время охлаждения раскатов составило 0,6 и 0,8 с. Расход воды ($Q_{охл}$) в камере охлаждения составил 30 м³/ч при давлении ($P_{охл}$) 15 бар и 45 м³/ч при давлении 20 бар. Испытания механических свойств проката выполнены на универсальных машинах при растяжении образцов по методике, приведенной в ГОСТ 1497-84.

На механические свойства термоупрочняемого проката существенное влияние оказывают целый ряд факторов (рис. 2), такие как химический состав стали, температура окончания и продолжительность ускоренного охлаждения, диаметр прутков. Все эти параметры при термоупрочнении по методу прерванной закалки с самоотпуском в конечном итоге воздействуют на важнейший параметр – температуру самоотпуска, которая при заданном химическом составе определяет структуру и свойства металла [3, 4]. Поэтому при производстве термоупрочняемых профилей имеется возможность регулирования механических свойств производимой продукции в широких пределах, изменяя скорость и температуру окончания ускоренного охлаждения [5].

Из всех элементов, вводимых в сталь, углерод является главным компонентом, определяющим ее прокаливаемость. Как показывают наши исследования, а так же исследования изложенные в работе [6], что при изменении содержания углерода на 0,01 % происходит изменение прочностных характеристик на 10–20 Н/мм², а пластических на 0,3–0,7 %

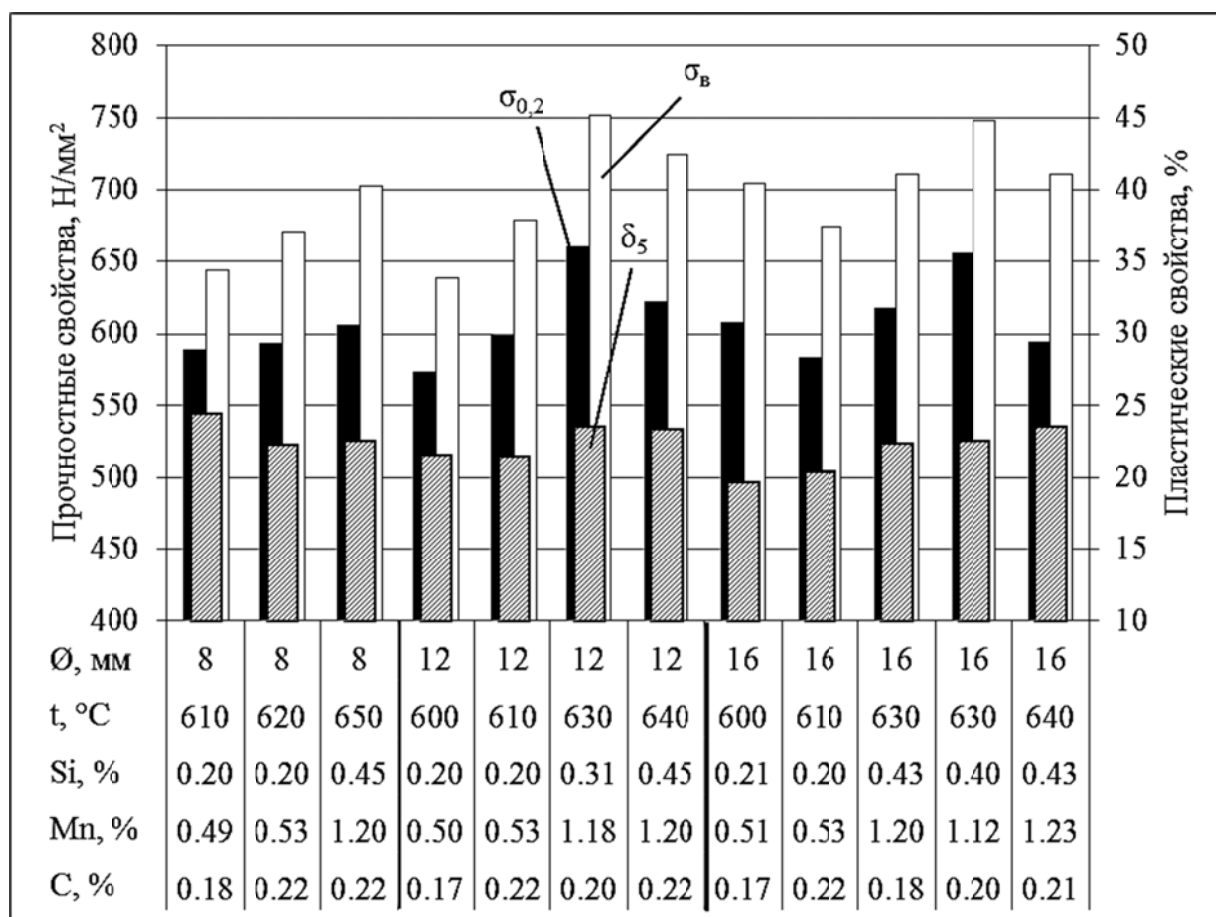


Рис. 2. Влияние углерода, марганца, кремния и температуры окончания ускоренного охлаждения на механические свойства арматурных профилей различного диаметра

Марганец активно повышает прочностные свойства проката, особенно предел текучести. Повышение концентрации марганца в стали с 0,53 % до 1,18 % привело к увеличению прочностных свойств на 70 Н/мм² или на 10 %. Дальнейшее повышение температуры окончания ускоренного охлаждения при постоянной концентрации марганца в 1,18–1,20 % показало, что прочностные свойства уменьшаются, но при этом, увеличивается отношение временного сопротивления к пределу текучести.

Кремний в стали в большей степени оказывает влияние на временное сопротивление, чем на предел текучести, а, следовательно, на отношение σ_b к $\sigma_{0,2}$. Повышение доли кремния в стали, содержащей 0,20 % углерода и 1,18 % марганца на 0,1 %, приводит к увеличению отношения σ_b к $\sigma_{0,2}$ с 1,13 до 1,16, что является существенным значением при производстве высокопрочных арматурных профилей.

О степени равномерности распределения свойств по длине прутка можно судить по величинам среднеквадратичных отклонений комплекса свойств. При средних значениях $\sigma_{0,2}$, σ_b , и δ_5 составляющих соответственно 580; 655 Н/мм² и 22,5 %, среднеквадратичные отклонения в той же последовательности составляют: $\pm 14,9$; 17,8 Н/мм² и 1,02 %.

Достичь требований к механическим свойствам класса прочности А500С по ГОСТ Р 52544-2006 и СТО АСЧМ 7-93 при температуре начала ускоренного охлаждения 1000 °С из низкоуглеродистой стали марки СтЗсп по ГОСТ 380-2005 можно, начиная с температуры окончания ускоренного охлаждения в 650 °С и ниже (рис. 2). Гарантировано достичь, требуемых классом прочности А600С, механических характеристик проката с температуры начала последеформационного ускоренного охлаждения 1000 °С не удалось на всем диапазоне изменения температур вывода из устройства термического упрочнения.

Снижение температуры начала охлаждения до 800 °С приводит к существенному повышению прочностных характеристик проката при незначительном снижении пластических. Средние значения результатов серии экспериментов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты серии экспериментов по охлаждению арматурного проката диаметром 16 мм из стали марки СтЗсп (C = 0,22 %; Mn = 0,61 %; Si = 0,20 %)

Расход воды ($Q_{охл}$), м ³ /ч	Время охлаждения ($\tau_{охл}$), с	Температура нагрева (T_0), °С	Давление воды ($P_{охл}$), бар	Температура окончания охлаждения ($T_{вых}$), °С	Скорость охлаждения ($V_{охл}$), град/с	Предел текучести (σ_T), Н/мм ²	Временное сопротивление (σ_B), Н/мм ²	Относительное удлинение (δ_5), %	Отношение σ_B/σ_T
45	0,8	800	20	450	438	703	814	14,6	1,16
30	0,8	800	15	510	363	721	809	16,1	1,12
45	0,6	800	20	525	458	640	748	18,3	1,15
30	0,6	800	15	560	400	599	709	19,1	1,18
45	0,8	900	20	520	475	701	787	16,4	1,12
30	0,8	900	15	565	419	633	725	17,5	1,14
45	0,6	900	20	600	500	571	679	18,7	1,19
30	0,6	900	15	635	442	517	634	20,8	1,23
45	0,8	1000	20	525	594	645	741	11,9	1,15
30	0,8	1000	15	555	556	575	690	14,0	1,20
45	0,6	1000	20	620	633	533	638	15,4	1,20
30	0,6	1000	15	645	592	431	574	18,2	1,33

Примечание : $V_{охл} = \frac{T_0 - T_{вых}}{\tau_{охл}}$.

По результатам выполненных исследований построены кривые, отображающие влияние температурно-временных параметров ускоренного охлаждения проката до 650 °С и ниже на комплекс механических свойств. На рис. 3 приведено влияние скорости и температуры окончания ускоренного охлаждения на предел текучести (σ_T) и временное сопротивление (σ_B) проката. Установлено, что гарантировано достичь, требуемых классом прочности А600С значений σ_T , возможно в диапазоне температур окончания термического упрочнения от 470 °С до 560 °С. Скорость охлаждения не должна превышать 500 °С/с и быть не ниже критической. Известно, что для стали марки СтЗсп величина критической скорости охлаждения составляет 360 °С/с [7]. Кривые 2 на рис. 3 свидетельствует, что минимальная скорость охлаждения составляет 410 °С/с.

При величине предела текучести более 600 Н/мм² значения временного сопротивления должны быть выше 740 Н/мм². Установлено, что достижение высоких значений σ_B возможно при соблюдении температурного режима от 470 °С до 520 °С при скорости охлаждения от 410 °С/с до 460 °С/с. Температура на входе в устройство составляет 800 °С.

Данные, приведенные на рисунке 3 свидетельствуют, что диапазоны изменений скорости и температуры окончания ускоренного охлаждения для достижения значений временного сопротивления 740 Н/мм² ($\Delta_{2,4}$) оказались почти в 2 раза более узкими, по сравнению с возможностью варьирования температурно-временными параметрами термического упрочнения проката с величиной предела текучести 600 Н/мм² ($\Delta_{1,3}$).



Рис. 3. Влияние температурно-временных параметров охлаждения на механические характеристики термически упрочненного проката Ø 16 мм из стали марки СтЗсп:

1 – температура окончания ускоренного охлаждения, °С; 2 – скорость охлаждения, °С/с

Как показывают исследования, пластические характеристики проката более чувствительны к изменению скорости, а, следовательно, к температуре начала, чем окончания термического упрочнения. Установлено, что на интервале температур от 510 °С до 610 °С и скорости охлаждения от 460 °С/с до 510 °С/с пластические характеристики гарантировано соответствуют требованию класса прочности А600С.

В зависимости от известных величин, таких как скорость ($V_{охл}$) и температура начала (T_0) и окончания ($T_{вых}$) ускоренного охлаждения, можно определить время охлаждения, а, следовательно, при заданной скорости прокатки ($V_{пр}$), длину охлаждающей трассы (L):

$$L = \frac{V_{пр}(T_0 - T_{вых})}{V_{охл}}.$$

Эта зависимость показывает, что при изменении температуры начала

термического упрочнения, для сохранения значений $T_{вых}$ и $V_{охл}$ постоянными, необходимо вносить изменения в величину скорости прокатки и расхода охладителя в устройстве [8].

ВЫВОДЫ

Изменение комплекса механических характеристик строительных сталей осуществляется не только за счет подбора химического состава, но и за счет варьирования температурно-временными параметрами охлаждения.

В результате легирования марганцем до 0,65 % и кремнием до 0,15 % свойства арматурной стали марки СтЗсп по ГОСТ 380-2005 с содержанием углерода 0,22 % в горячекатаном состоянии повышаются до класса прочности А-II по ГОСТ 5781-82. При легировании стали, содержащей 0,30 % углерода и 1 % марганца, кремнием до 0,35 % комплекс механических свойств горячекатаной арматуры повышается до уровня требований класса прочности А-III.

В промышленных условиях проведены экспериментальные исследования влияния углерода, марганца и кремния в углеродистой стали в малых концентрациях, в пределах требований ГОСТов, а также режима последеформационного охлаждения с температуры 1000 °С и ниже термоупрочняемых сталей на изменение механических свойств проката различного сечения. Установлено, что методом прерванной закалки с прокатного нагрева в потоке стана возможно производить сортовой прокат высокой прочности с пределом текучести (σ_T) более 500 Н/мм².

Термическое упрочнение арматуры из низкоуглеродистой стали марки СтЗсп обеспечивает достаточно удовлетворительную однородность механических свойств по длине раската, укладываемых в рамки требований класса прочности А500С стандарта ГОСТ Р 52544-2006 и СТО АСЧМ 7-93.

Исследования комплекса механических свойств арматурного проката из стали марки СтЗсп постоянного химического состава диаметром 16 мм показывают, что для достижения требований к комплексу механических характеристик термически упрочненных арматурных профилей для класса прочности А600С по СТО АСЧМ 7-93 необходимо осуществлять ускоренное охлаждение с рекомендуемой температуры окончания деформации 800 °С до 450–550 °С.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальные исследования технологии производства периодических профилей для железобетонных конструкций с заданным комплексом механических свойств / Трусов В. А., Зинкевич М. Б., Смрыгина И. В., Зиновьев А. В., Дья Х. // *Metallurgy 2010. New technologies and achievements.* – Czestochowa, 2010. – С. 8–28
2. Скороходов В. Н. Струительная сталь / В. Н. Скороходов, П. Д. Одесский, А. В. Рудченко. – М. : *Металлургиздат*, 2002. – 624 с.
3. Исследование влияния температуры конца прокатки и температуры поверхности раската в период охлаждения на свойства / В. Т. Худик, В. Т. Черненко, В. А. Шеремет [и др.] // *Теория и практика металлургии.* – 2001. – № 2. – С. 41–42.
4. Формирование температуры самоотпуска в некоторых арматурных сталях / Худик В. Т., Гунькин И. А., Костюченко М. И., Журавлев И. И. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2004. – № 3. – С. 235–238.
5. Трусов В. А. Исследования технологии производства периодических профилей для железобетонных конструкций из низкоуглеродистой стали по различным классам прочности / В. А. Трусов, М. Б. Зинкевич // *Труды VI Международной научно-практической конференции.* – Темиртау, 2011. – С. 298–304.
6. Высокопрочная арматурная сталь / Кузущин А. А., Узлов И. Г., Калмыков В. В., Мадатян С. А., Ивченко А. В. – М. : *Металлургия*, 1986. – 272 с.
7. Попов А. А. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. *Справочник термиста* / А. А. Попов, Л. Е. Попова. – М. : *Металлургия*, 1965. – 430 с.
8. Трусов В. А. Теоретическое и экспериментальное исследование ускоренного охлаждения сортового проката с принудительным вращением охладителя / В. А. Трусов, М. Б. Зинкевич // *Nowe technologie w metalurgii i inzynierii materialowej. XII Miedzynarodowa konferencja naukowa* – Czestochowa : *Politechnica Czestochowska*, 2011. – S. 366–372.

Трусов В. А. – д-р техн. наук, проф. МИСиС;

Зиновьев А. В. – д-р техн. наук, проф. МИСиС;

Зинкевич М. Б. – инж., нач. прокатного цеха АО «Лиепаяс Металургс».

МИСиС – Московский институт стали и сплавов, г. Москва, Россия.

АО «Лиепаяс металургс» – Акционерное общество «Лиепаяс металургс», г. Лиепая, Латвия.

E-mail: pdss@misis.ru