

УДК 669.45+669.046.558

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В МИКРОБЪЕМАХ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ Ст1кп**

С. А. Полишко, к. т. н.

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

обладают повышенной пластичностью, мелкие – повышенной прочностью. Однородная структура наиболее полно отвечает истинной прочности с пластичностью. Чем более мелкозернистая структура получена после кристаллизации слитка и его деформации, тем более надежным оказывается металл с позиции конструктивной прочности, надежности и долговечности в эксплуатации. Ведь очень важным является вопрос длительной стойкости материалов железобетонных конструкций, поэтому для них используют железобетон, являющийся композитом, упрочнителем которого служит стальная катанка.

Сталь общего назначения Ст1кп, выплавленная с участием авторов в 160-тонных конверторах, которая может быть использована для железобетона, обладает структурой, свойствами и составом, удовлетворяющими требованиям, указанным выше. Это подтверждено нашими экспериментальными исследованиями [1–3].

Введение. Одной из наиболее важных трудно решаемых проблем металлургии является получение однородной структуры металла. Крупные зерна **Материал и методы исследования.** Были исследованы также образцы горячекатаных прутков Ст1кп серийного производства. Анализ 34 промышленных плавок стали Ст1кп показал следующее.

1. Из-за больших концентрационных интервалов легирующих элементов С, Мп, Si, Cr, Мо, Mo, Cu и V (табл. 1) в реальном металле имеет место большой межплавочный и внутриплавочный разброс химических элементов и, соответственно, механических свойств (табл. 2).

Таблица 1

Химический состав малоуглеродистой стали Ст1кп
по ДСТУ 2651-2005 (ГОСТ 380-2005)

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P	As	N
Ст1кп	0,06–0,12	0,25–0,50	≤0,05	≤0,3	≤0,3	≤0,3	≤0,05	≤0,04	≤0,08	≤0,01

Таблица 2

Механические свойства малоуглеродистых сталей
по ДСТУ 2770-94

Марка стали	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное сужение ψ , %
Ст1кп	≤ 420	≥ 68

2. В силу тех же причин серийный металл имеет сильно разнородную структуру, что также пагубно сказывается на качестве готовой стали и, следовательно, на длительной стойкости материалов железобетонных конструкций.

Поэтому одной из первых задач, поставленных по структурообразованию сталей строительного назначения, являлось формирование однородной мелкозернистой структуры. По результатам 31 измерения по методу секущих [4; 5] каждого из 5 образцов готовой катанки модифицированных и немодифицированных серийных плавок, как показано на рисунках 1–3, установлено следующее:

- средние размеры зерен в модифицированных образцах оказались в ~ 2 раза меньше, чем в немодифицированной катанке;
- степень разнородности образцов под влиянием модифицирования снизилась в 2 раза.

Структура катанки Ø 6,5 мм стали Ст1кп после всех видов обработок, начиная от жидкого состояния до деформации и термической обработки в твердом состоянии, представлена ферритом + перлитом.

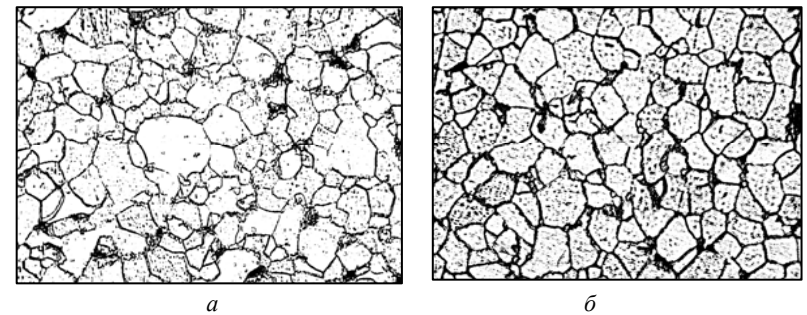


Рис. 1. Разнородная структура малоуглеродистой немодифицированной стали Ст1кп (а) и однородная структура модифицированной стали той же марки (б), × 600

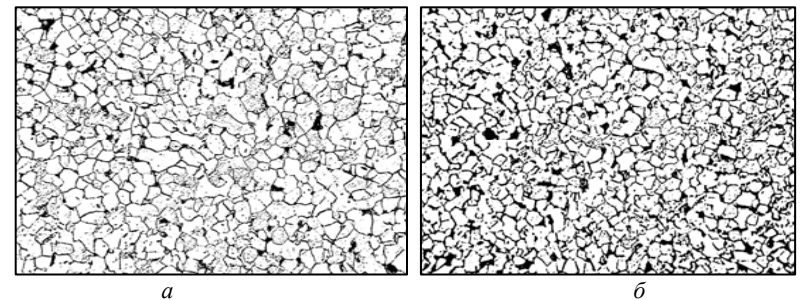


Рис. 2. Разнородная структура малоуглеродистой немодифицированной стали Ст1кп (а) и однородная структура модифицированной стали той же марки (б), × 150

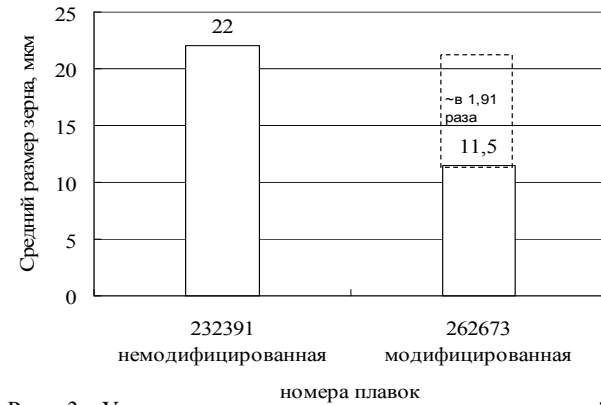


Рис. 3. Уменьшение размера зерна малоуглеродистой стали Ст1кп под влиянием модифицирования, $\times 600$

Феррит занимал $\sim 90\%$ площади шлифов, перлит + частично верхнетемпературный бейнит $\sim 10\%$. Сравнение структур указывает на несколько большее количество перлита в катанке, полученной из металла, обработанного модификатором [3]. Это согласуется с несколько более высоким (на 5–6% к среднему значению) содержанием здесь углерода и соответственно большим значением предела прочности σ_b (рис. 4).

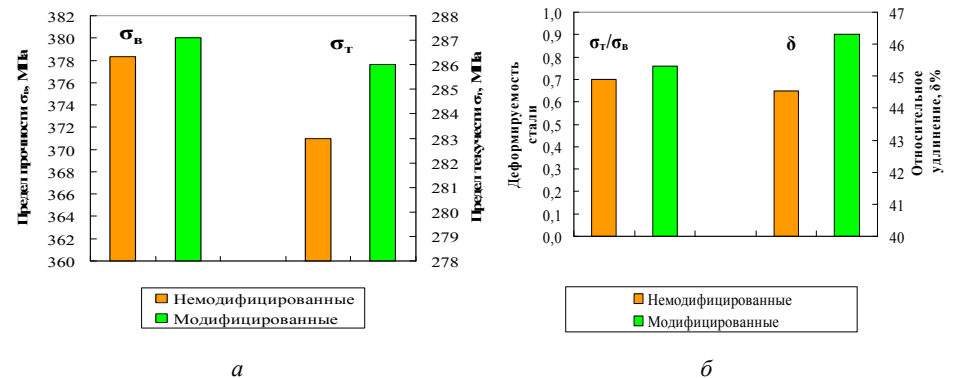


Рис. 4. Средние значения характеристик прочности (σ_b и σ_T) (а), деформируемости (σ_T/σ_b) (б) и пластичности (δ) (б) согласно механическим свойствам стали Ст1кп, обработанной модификаторами многофункционального действия и алюминием утяжеленным Al (у)

Для обеспечения требуемой структуры и требуемого уровня механических свойств серийной катанки ее после окончания деформации подвергают «дождеванию» по идее и разработке академика

К. Ф. Стародубова. Если первая установка действовала с разбрызгиванием водяных струй по одному режиму, то в последние годы по разработке ИЧМ и ОАО «Ареслор Миттал Кривой Рог» процесс термической обработки катанки с прокатного нагрева усовершенствовали, сделали его более гибким. В настоящее время возможно управлять с помощью компьютерной автоматики процессом термической обработки с прокатного нагрева, изменяя скорость подачи наливов воды при дождевании, то есть интенсифицируя скорость охлаждения катанки, а также скорость ее движения. В зависимости от скорости охлаждения по данным ОАО «Ареслор Миттал Кривой Рог» стало возможным получение в катанке структур Ф + П (феррита + перлита), Ф+П+Б (феррита + перлита + верхнего бейнита), Ф + П + Б + Ц (феррита + перлита + верхнего бейнита + структурно-свободного цементита). В зависимости от типа структуры изменяется прочность катанки.

Такая технология позволила повысить прочность на 5 %. Однако металл, обладая рядом недостатков для специального назначения, нуждался в улучшении. Одним из возможных путей, кроме модифицирования, являлась разработка оптимальной термической обработки с прокатного нагрева. Для его разработки были построены термокинетические диаграммы состояния стали Ст1кп модифицированных и серийных плавок.

В зависимости от содержания углерода в стали изменялся режим охлаждения. Для модифицированной стали построена термокинетическая диаграмма состояния, которая позволяет, в зависимости от требований, регулировать все технические температурно-временные параметры процесса обработки (рис. 5). В зависимости от получения сорбита, перлита, троостита, мартенсита, в структуре, согласно данным термокинетической диаграммы, регулируются параметры процесса. Всевозможные структуры при обработке металла Ст1кп с прокатного нагрева по идее и разработке К. Ф. Стародубова получены нами для модифицированной стали Ст1кп (рис. 6).

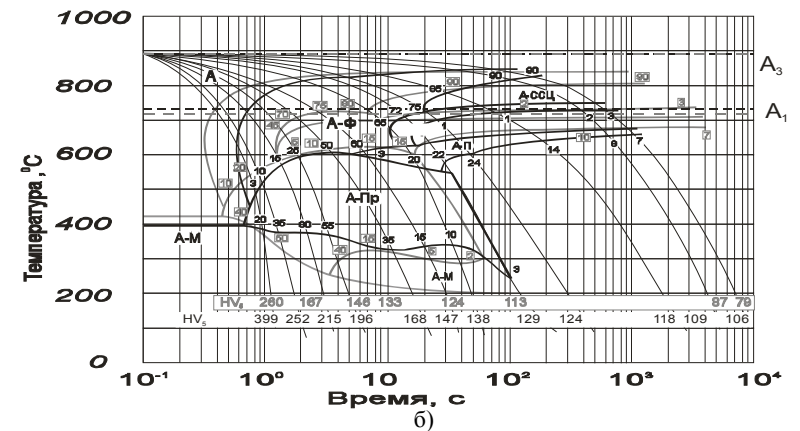


Рис. 5. Термокинетическая диаграмма распада аустенита модифицированной (темная линия) и серийной (светлая линия) стали Ст1кп

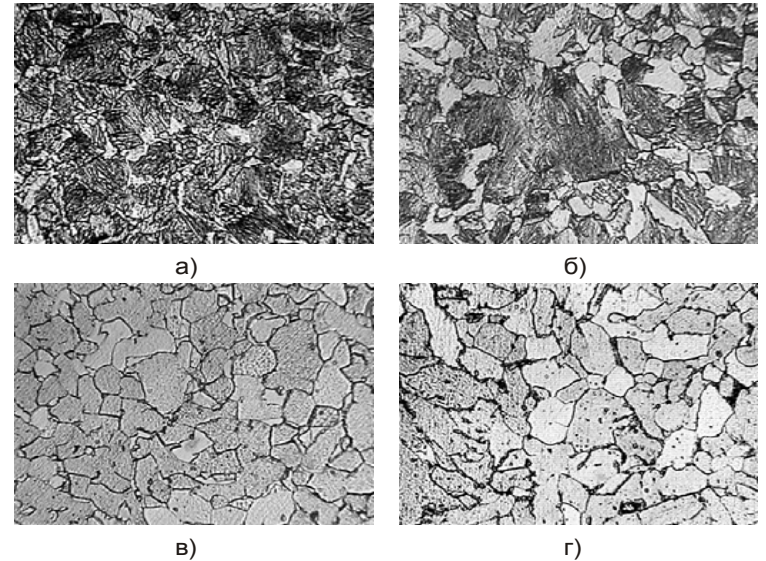


Рис. 6. Микроструктура образцов стали Ст1кп (модифицирование) $\times 500$, скорости охлаждения, температуры закалки:
 $a - V_{\text{охл}} = 3,60 \text{ }^\circ\text{C/c}$ $t_{\text{ЗАКАЛКИ}} = 7\ 950 \text{ }^\circ\text{C}$; $б - V_{\text{охл}} = 3,60 \text{ }^\circ\text{C/c}$ $t_{\text{ЗАКАЛКИ}} = 7\ 000 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $в - V_{\text{охл}} = 3,60 \text{ }^\circ\text{C/c}$ $t_{\text{ЗАКАЛКИ}} = 6\ 700 \text{ }^\circ\text{C}$; $г - V_{\text{охл}} = 3,60 \text{ }^\circ\text{C/c}$ $t_{\text{ЗАКАЛКИ}} = 5\ 700 \text{ }^\circ\text{C}$

В горячекатаном металле после деформации и термообработки путем дождевания проволоки с прокатного нагрева были проведены исследования на распределение элементов в металле с помощью японского микроскопа JEOL SUPERPROBE 733.

На установке для построения термокинетических диаграмм распада аустенита построена диаграмма для модифицированной и немодифицированной стали. В связи с широким интервалом времени охлаждения образцов от 10^{-1} до 10^4 с, шкала абсцисс дана в логарифмическом варианте. Установка включала печь для нагрева образцов, потенциометр ПДГ 4, самописец, а также компьютер, с помощью которого структуры выводили на микроскоп для фотографирования. Охлаждающими средами являлись воздух, вода, подсолённая (10 % NaCl) вода. Для построения термокинетической диаграммы распада аустенита в модифицированных образцах их нагревали до критической точки A_3 и охлаждали с разными скоростями. Далее их запрессовывали в порядке увеличения скоростей охлаждения, изготавливали шлифы и фотографировали. Затем на шлифах измеряли твердость и наносили на кривые охлаждения (рис. 6). На основании анализа термокинетических диаграмм состояния микроструктуры твердости был определен температурно-временной режим охлаждения катанки из модифицированной стали: скорость охлаждения должна находиться в

пределах от 1,6 до 3,6 град/с, а температура термообработки с прокатного нагрева < 670 °С.

Следовательно, аустенит в ней более устойчивый благодаря большей степени легированности, что обосновано большей стабильностью химического состава. Рекомендованная микроструктура (Ф+П) для модифицированной стали соответствует рисунку 6 в и г. Они отличаются тем, что диаграмма для немодифицированной стали смещена влево и вниз по отношению к диаграмме распада модифицированного металла.

Исследовано также распределение основных легирующих элементов марганца, кремния и хрома в немодифицированных и модифицированных образцах катанки из стали Ст1кп на установке JEOL SUPERPROBE 733 в отраженных электронах. Здесь светящиеся точки определяют положение атомов каждого из перечисленных элементов в поле зрения при $\times 3\,000$. Установлено:

– распределение марганца достаточно равномерное в модифицированном образце (рис. 7 б), в немодифицированном имеется включение, по видимому, MnS, с повышенной локальной концентрацией Mn (рис. 7 а);

– распределение кремния более однородное в модифицированном образце (рис. 8 б) в сравнении с немодифицированным (рис. 8 а), где тоже имеется скопление атомов Si на базе монооксида кремния, присутствие которого нежелательно из-за его охрупчивающего действия на металл. Появление SiO связано с более высоким содержанием кремния в немодифицированной стали Ст1кп (0,05 % мас. против 0,03 % мас. Si в модифицированной стали Ст1кп) и неравномерным распределением атомов Si в феррите;

– распределение хрома отличается большей неоднородностью в сравнении с распределением Si и Mn в стали Ст1кп. Однако более равномерно распределен Cr в модифицированной стали Ст1кп (рис. 9 б) в сравнении с немодифицированной (рис. 9 а), где имеются локальные места, обогащенные Cr, по-видимому, на базе включений. Этот эффект значительно слабее проявляется в образцах катанки из модифицированной стали Ст1кп. Таким образом, доказан экспериментально высокоточным методом факт более равномерного распределения легирующих элементов в модифицированной стали Ст1кп.

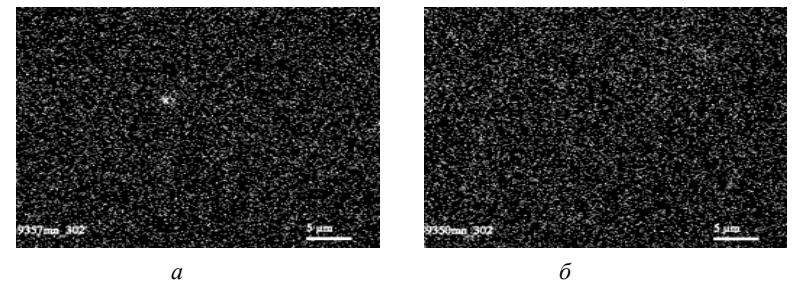


Рис. 7. Распределение марганца в малоуглеродистой стали Ст1кп: а – немодифицированной, $\times 3\,000$; б – модифицированной, $\times 3\,000$

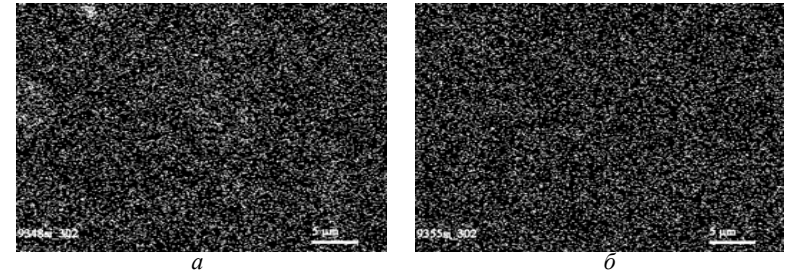


Рис. 8. Распределение кремния в малоуглеродистой стали Ст1кп: *a* – немодифицированной, $\times 3\ 000$; *б* – модифицированной, $\times 3\ 000$

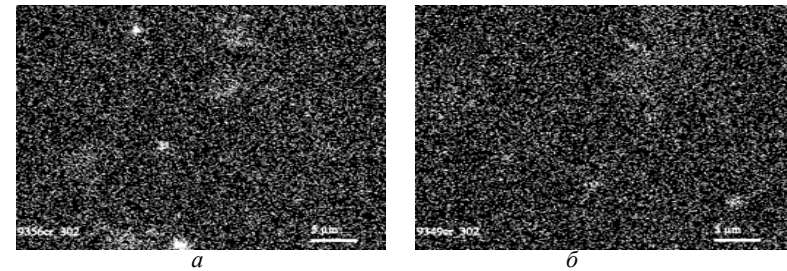


Рис. 9. Распределение хрома в малоуглеродистой стали Ст1кп: *a* – немодифицированной, $\times 3\ 000$; *б* – модифицированной, $\times 3\ 000$

ВЫВОДЫ

1. Анализ 34 промышленных плавков стали Ст1кп показал, что из-за больших концентрационных интервалов легирующих элементов С, Мп, Si, Cr, Mo, Mo, Cu и V в реальном металле имеет место большой межплавочный и внутриплавочный разброс химических элементов и, соответственно, механических свойств.

2. По результатам 31 измерения по методу секущих каждого из 5 образцов готовой катанки модифицированных и немодифицированных серийных плавков установлено, что средние размеры зерен в модифицированных образцах оказались в ~ 2 раза меньше, чем в немодифицированной катанке; степень разноразмерности образцов под влиянием модифицирования снизилась в 2 раза.

3. На основании анализа термокинетических диаграмм состояния микроструктуры твердости был определен температурно-временной режим охлаждения катанки из модифицированной стали: скорость охлаждения должна находиться в пределах от 1,6 до 3,6 град/с, а температура термообработки с прокатного нагрева $< 670\ ^\circ\text{C}$.

4. Исследовано также распределение основных легирующих элементов марганца, кремния и хрома в немодифицированных и модифицированных образцах катанки из стали Ст1кп на установке JEOL SUPERPROBE 733 в отраженных электронах.

Литература

1. Шаповалова О. М. Стабилизация химического состава и механических свойств в сталях 1кп и R7 под влиянием модифицирования / О. М. Шаповалова, А. Е. Камышный, А. В. Шаповалов, С. А. Полишко, М. А. Кушнир, Е. Н. Майстренко, Ю. А. Финдлинг // Строительство, материаловедение, машиностроение / Вып. 48, ч. 3. – Днепропетровск : ПГАСА, 2009. – 232 с. (в обл.)
2. Шаповалов А. В. Влияние неметаллических включений и структуры на трещинообразование в колесной стали / А. В. Шаповалов, Е. Н. Майстренко, Л. Я. Кульчицкая, С. А. Полишко, Ю. В. Татарко / Тез. докл. 70-й Междунар. науч.-метод. конф. «Проблемы развития железнодорожного транспорта» // Д. : Вестник ДНУЖДТ, 2010. – С. 300–301.
3. Патент на винахід № UA 85254. Композиційний розкислювач для обробки сталей / О. М. Шаповалова, В. П. Шаповалов, А. В. Шаповалов, С. О. Полішко. Державний департамент інтелектуальної власності, ДНУ, а 2007 008 58, заявл. 26.01.2007 р., опубл. 12.01.2009 р., бюл. № 1.
4. Тушинский Л. И. Методы исследования материалов / Л. И. Тушинский, А. В. Плохое, А. О. Ерев, В. И. Синдеев. – М. : Мир, 2004. – 384 с.
5. Салтыков В. А. Стереометрическая металлография / В. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1976. – 376 с.