

Большаков Вл. И. /д. т. н./, Чайковская А. О.  
ГБУЗ «ПГАСиА»

## Структурные превращения наружных слоев термически упрочненной арматуры при повторном нагреве

*Электронно-микроскопическим методом исследована структура наружного слоя, образующаяся при термическом упрочнении стержневой арматуры класса А 500С, а также морфологические изменения, происходящие при повторном нагреве. Показано, что основное снижение прочностных свойств низкоуглеродистой стали с мартенситной структурой при повторном нагреве до 650 °С обусловлено распадом мартенситной фазы. Выделение атомов углерода из твердого раствора сопровождается образованием и ростом глобулярных карбидных частиц, снижением плотности дислокаций и величины внутренних микронапряжений. Ил. 5. Библиогр.: 6 назв.*

**Ключевые слова:** термическое упрочнение, стержневая арматура, повторный нагрев, электронная микроскопия, структура

*The structure of the outer layer, which is formed by thermal hardening of bar reinforcement of class A 500C, and also the morphological changes that occur during reheating are studied with the help of electron microscopical method.*

*It is shown that the main reduction of the strength properties of low-carbon steel with a martensite structure under reheating at 650 °C is caused by the decay of the martensite phase. Disengagement of carbon atoms from solid solution is accompanied with formation and growth of globular carbide particles, and also by reducing of the dislocation density and values of internal microstresses.*

**Keywords:** thermal hardening, bar reinforcement, reheating, electron microscopy, structure

### Введение

Для армирования железобетонных конструкций, применяемых в гражданском и промышленном строительстве, используют арматуру повышенной и высокой прочности, позволяющей снизить расход металла. Изделия из новых видов материалов должны обеспечивать не только прочность, жесткость, но и противопожарные требования по огнестойкости. Огнестойкость железобетонных конструкций не может быть оценена без установления фактических пределов огнестойкости элементов конструкций, поскольку в нагретом состоянии механические свойства арматурных сталей с повышением температуры снижаются [1].

Особенностью термомеханически упрочненной арматуры является образование метастабильных структур, чувствительных к повторному нагреву. Термически упрочненная с прокатного стана стержневая арматура в процессе изготовления конструкций подвергается тепловой обработке, в результате появляется опасность снижения прочности до уровня свойств горячекатаного проката.

В процессе термического упрочнения по сечению стержневой арматуры образуется неоднородная структура. Выявленная после глубокого травления макроструктура термоупрочненной арматуры состоит из темного наружного ободка и более светлой внутренней кольцевой зоны (середины) [2, 3].

В поверхностном слое стержней в результате ускоренного охлаждения аустенит превращается в мартенсит, т. е. происходит закалка. После выхода стержней из охлаждающего устройства поверхностные слои пре-

терпевают самоотпуск за счет тепла внутренней зоны.

Влияние повторного нагрева исследовали на структурах наружного слоя термически упрочненной арматуры, сформированных по механизму бездиффузионного сдвигового превращения (мартенситного). Структуры такого типа представляют интерес с точки зрения закономерностей их формирования, т. к. они практически всегда в том или ином объеме присутствуют в термически упрочненной арматуре.

**Целью настоящей работы** являлось изучение структуры наружного слоя, образующегося при термическом упрочнении арматуры класса А 500С после повторного нагрева.

### Материал и методика исследования

Материалом исследования служила термически упрочненная стержневая арматура диаметром 22 мм из стали СтЗпс производства ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог». Исследования микроструктуры проводили методами электронной микроскопии по методике, описанной в [4].

### Результаты исследований

Поверхностный слой термически упрочненной арматуры представляет собой отпущенный реечный мартенсит (далее мартенсит) с высокой плотностью дислокаций (рис. 1а). Наблюдаемая ширина рек изменяется в значительном интервале значений от долей до 1 мкм. В отдельных мартенситных кристаллах могут наблюдаться тонкие двойниковые прослойки. В большей части широких рек, которые предположительно располагались большей гранью рейки параллельно плоскости фольги, наблюдаются выделения

цементита высокой дисперсности в виде штрихов (рис. 1б). Указанные штриховые цементитные выделения ориентированы по нескольким направлениям. Выделения карбидной фазы очевидно обусловлено развитием процессов самоотпуска мартенсита при относительно высокой температуре превращения. Для стали Ст3, в которой содержание углерода составляло значение на уровне 0,21 %, температура начала мартенситного превращения близка к 500 °С. На основании этого, можно полагать, что уже в исходном состоянии в мартенсите (без учета влияния самоотпуска) присутствуют высокодисперсные цементитные частицы (рис. 1б). Сравнительный анализ с известными экспериментальными данными [5] показывает, что аналогичные частицы формируются в сталях с более высоким содержанием углерода, специально легированных лишь на первой стадии отпуска.

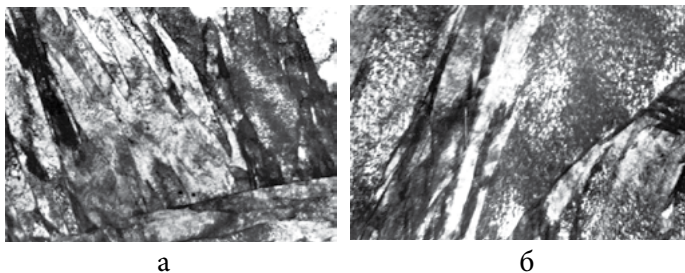


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя термически упрочненной арматуры Ø 22 мм, Ст3, ×18000

Исследования внутреннего строения металла с использованием светового микроскопа не выявили существенных изменений в структуре термически упрочненной арматуры после отпуска при температурах 350-450 °С. Использование электронно-микроскопических исследований позволило выявить изменения внутреннего строения металла, которые могут объяснить наблюдаемые изменения свойств. Анализ полученных результатов показывает, что в процессе отпуска в указанном температурном интервале, начиная от 350 °С, происходит дальнейшее выделение атомов углерода из твердого раствора. Подтверждается приведенное положение (кроме выделения углерода еще в процессе закалки) образованием новых карбидных частиц как внутри, так и на границах кристаллов. Частицы выделяются на двойниках с одновременным округлением и увеличением размеров ранее сформированных частиц (рис. 2).



Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя термически упрочненной арматуры Ø 22 мм, Ст3 после повторного нагрева до 350 °С, ×18000

При температурах нагрева около 450 °С структурными исследованиями обнаружены признаки

начала перераспределения дислокаций и незначительное снижение их плотности. Совместное развитие указанных процессов объясняет наблюдаемое начало разупрочнения термически упрочненных арматурных стержней при отпуске в интервале 450-500 °С.

На основании полученных результатов можно полагать, что разупрочняющее влияние снижения степени пересыщения твердого раствора, уровня внутренних напряжений, плотности дислокаций, огрубления цементитных частиц превышает суммарный эффект от развития процессов старения и дисперсионного упрочнения от частиц цементита.

Дальнейшее повышение температуры отпуска до 500-550 °С сопровождается качественными структурными изменениями. Анализ внутреннего строения металла показал интенсивное развитие полигонизационных процессов в рейках мартенситной фазы. Эти изменения структуры сопровождаются формированием дополнительных субграниц и совершенствованием уже имеющихся. Наблюдается существенное снижение плотности дислокаций внутри сформированных фрагментов, образованных внутри реек мартенситных кристаллов. Процессы увеличения цементитных частиц, которые располагаются на границах мартенсита и некоторых субграницах фрагментов, ускоряются (рис. 3а). Снижается количество карбидной фазы внутри реек, растет количество частиц глобулярной формы.

Неравномерность протекания указанных процессов в микрообъемах металла приводит к различиям их тонкого строения. Повышенная плотность дислокаций (рис. 3б) наблюдается в кристаллах, в которых сохраняются дисперсные выделения карбидной фазы.

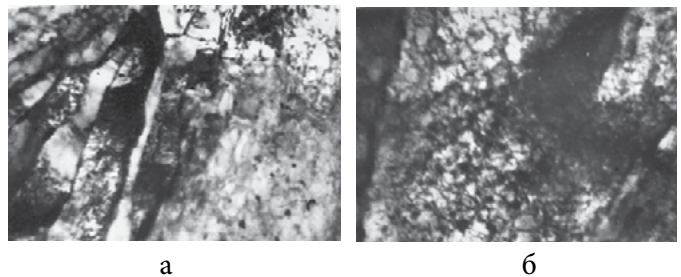


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя термически упрочненной арматуры Ø22 мм, Ст3 после повторного нагрева до 550 °С, ×18000

При повышении температуры отпуска до 600 °С обнаруживаются признаки формирования зародышей рекристаллизации. Структурные изменения позволяют выявить механизм рекристаллизации за счет исчезновения малоугловых границ (рассыпание границ), коалесценции соседних реек и полигональных ячеек (рис. 4а). Исчезновение субграниц сопровождается уходом дислокаций из внутренних объемов реек. Частично дислокации, которые высвобождаются от исчезновения (рассыпания) субграниц, переходят на соседние границы, способствуя росту их разориентации и превращению в большеугловые границы (рис. 4б).

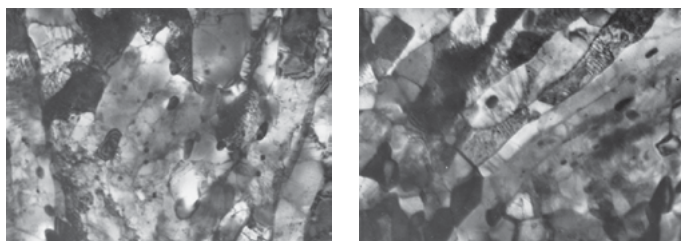


Рис. 4. Микроструктура поверхностного слоя термически упрочненной арматуры Ø 22 мм, Ст3 после повторного нагрева до 600 °С, ×18000

Параллельно с полигонизационными процессами и рекристаллизацией ферритной фазы, при температурах отпуска 600 °С продолжается коалесценция частиц цементита. Различное расположение глобул карбидной фазы приводит к преимущественному растворению одних частиц и росту других. Частицы, которые расположены на границах раздела, укрупняются. Неоднородность распределения карбидных частиц приводит к неравномерности протекания рекристаллизационных процессов в микрообъемах упрочненного и отпущенного металла (см. рис. 4б). Во многих участках структуры сохраняется строение феррита, подобного речечному, с неоднородным распределением дислокаций.

Наблюдаемые процессы изменения строения наружного слоя арматурного стержня сопровождаются снижением прочностных свойств и ростом пластических характеристик.

Структурные зоны в арматурном стержне диаметром 22 мм, выявленные при металлографическом исследовании [3, 4, 6], обуславливают различную твердость по сечению от поверхности к центру. Приведенные данные (рис. 5) показывают, что в результате повторного нагрева степень снижения микротвердости в наружном слое происходит интенсивнее, чем в сердцевине, и это уменьшение составляет порядка 750 МПа при температуре нагрева 650 °С. Таким образом, при разупрочнении поверхностного слоя происходит выравнивание микротвердости по сечению арматурного стержня.

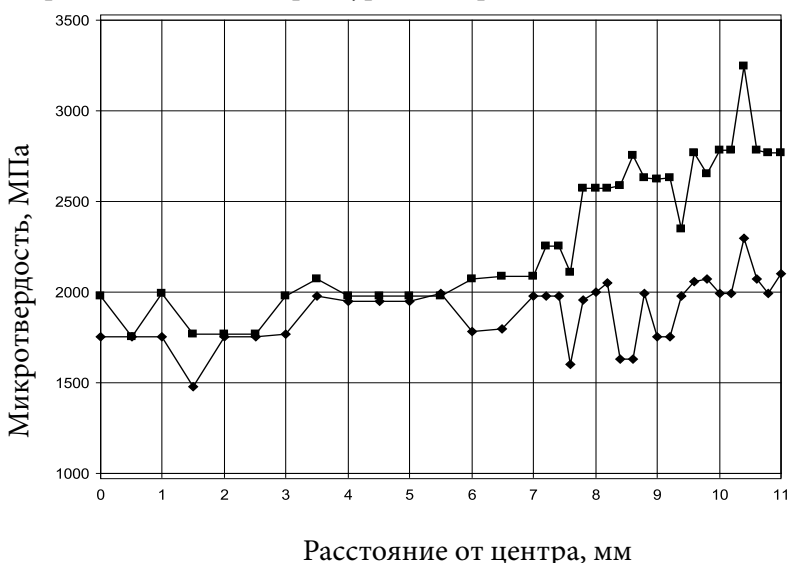


Рис. 5. Распределение микротвердости по сечению арматуры Ø22 мм: 1 – термически упрочненной, 2 – после повторного нагрева при 650 °С

**Выводы**

Установлено, что основное снижение прочностных свойств при повторном нагреве низкоуглеродистой и низколегированной стали с мартенситной структурой до 650 °С обусловлено распадом мартенситной фазы.

Показано, что выделение атомов углерода из твердого раствора сопровождается образованием и ростом глобулярных карбидных частиц, снижением плотности дислокаций и величины внутренних микронапряжений.

В результате повторного нагрева происходит выравнивание микротвердости по сечению арматурного стержня.

Результаты исследований могут быть использованы для управления структурой и свойствами при термическом упрочнении арматурного проката.

**Библиографический список**

1. Милованов А. Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. - М.: Стройиздат, 1986. - 225 с.
2. Одесский П. Д., Зборовский Л. А., Абашева Л. П. О теоретических основах повышения прочности арматурной стали нового поколения // Бетон и железобетон. - 1997. - № 1. - С. 5-8.
3. Большаков В. И., Шерemet В. А., Чайковская А. О. и др. Взаимосвязь структурной неоднородности термически упрочненной арматуры с изменением твердости по сечению стержней // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. тр. Вып. 36, ч. 1. - Днепропетровск: ПГАСА, 2006. - С. 59-167.
4. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Чайковская А. О. Электронно-микроскопическое исследование структуры и свойств термически упрочненной арматуры после повторного нагрева // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. тр. Вып. 48, ч. 3. - Днепропетровск: ПГАСА, 2009. - С. 66-71.
5. Лысак Л. И., Николин Б. И. Физические основы термической обработки стали. - К.: Техніка, 1975. - 304 с.
6. Большаков В. И., Шерemet В. А., Чайковская А. О. и др. Исследование структурных зон, образующихся при термическом упрочнении стержневой арматуры // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. тр. Вып. 32, ч. 1. - Днепропетровск: ПГАСА, 2005. - С. 81-85.

Поступила 22.10.2013