

УДК 669.017:669.15

Д-р техн. наук И. А. Вакуленко<sup>1</sup>, канд. техн. наук О. Н. Перков<sup>2</sup>, Д. М. Болотова<sup>3</sup><sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна,<sup>2</sup>Институт черной металлургии НАН Украины, <sup>3</sup>Днепропетровский профессиональный железнодорожный лицей; г. Днепропетровск

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПРИ ОТПУСКЕ ЗАКАЛЕННОЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

*Рассмотрены вопросы изменения структуры и свойств при отпуске закаленной на мартенсит среднеуглеродистой стали. При отпуске от температур 250–300 °С эффекты разупрочнения в закаленной углеродистой стали превышают влияние от закрепления дислокаций атомами углерода и развития процессов дисперсионного упрочнения.*

**Ключевые слова:** структура, мартенсит, цементит, сталь, закалка, отпуск.

### Введение

В процессе термической и термомеханической обработки соотношение объемных долей структурных составляющих определяет уровень свойств проката [1, 2]. Формирование определенной структуры металла зависит от скорости охлаждения и стабильности аустенитной фазы [3]. На основании аддитивного вклада структурных составляющих углеродистой стали в общий уровень прочностных характеристик [4], различное сочетание степени горячей пластической деформации, величины паузы до начала интенсивного охлаждения позволяет комбинировать фазовый состав и структурную неоднородность металла [5]. Учитывая определенную зависимость устойчивости аустенита от соотношения легирующих химических элементов, незначительное изменение состава металла при неизменных условиях ускоренного охлаждения может существенно изменять фазовый состав и связанный с ним комплекс свойств [2, 3].

В процессе прерванной закалки, когда градиент структур по сечению зависит от температуры окончания принудительного охлаждения, отпуск металла за счет нагрева от тепла внутренних объемов может по-разному оказывать влияние на качественно различные структуры [5]. Дополнительное изучение структурных превращений в процессе отпуска термомеханически упрочненного проката по технологии прерванной закалки представляет определенный научный интерес в направлении уточнения характера развития эффектов разупрочнения.

### Цель работы

Целью работы являлся анализ процессов структурообразования при отпуске закаленной среднеуглеродистой стали.

### Материал и методика исследований

Материалом для исследования служил проволоочный прокат диаметром 5 мм из стали с содержанием

0,31 %С, 0,08 %Si, 0,45 %Mn, 0,0029 %S, 0,014 %P, 0,11 %Cr. Образцы закаливали от нормальных температур нагрева, далее следовал отпуск при температурах 200–450 °С.

Структура исследовалась с использованием методик световой и электронной микроскопии [1, 6]. Оценку количества остаточного аустенита и плотности дислокаций осуществляли используя методики рентгеновского структурного анализа [7].

Механические характеристики: временное сопротивление разрушению ( $\sigma_b$ ), относительные удлинение ( $\delta$ ) и сужение ( $\psi$ ) определяли при растяжении со скоростью деформации  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Микротвердость структурных составляющих измерялась микротвердомером ПМТ-3.

### Результаты и их обсуждение

Исследования внутреннего строения термически упрочненного проката из среднеуглеродистой стали показали качественное совпадение с ранее известными экспериментальными данными [1, 2, 5].

В результате закалки от нормальных температур нагрева структура исследуемой стали представляет собой реечный мартенсит с высокой плотностью дислокаций (рис. 1).

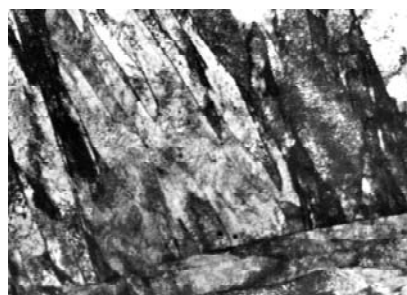


Рис. 1. Структура стали после закалки  $\times 18000$

Наблюдаемая ширина реек изменялась в интервале значений от долей до 1 мкм. В отдельных мартенситных кристаллах обнаруживаются тонкие двойниковые прослойки. В случае совпадения большей грани рейки с плоскостью исследования (плоскость фольги) наблюдаются случайно ориентированные выделения цементита, высокой степени дисперсности. Анализ полученных результатов с учетом известных экспериментальных данных [8, 9] указывает, что формирование выделений карбидной фазы обусловлено развитием процессов самоотпуска мартенсита при относительно высокой температуре превращения, которая для стали с 0,31 % C составляет около 400–450 °С. На основании этого можно полагать, что уже в процессе формирования самого мартенситного кристалла на определенном этапе должно неизбежно начаться выделение высокодисперсных цементитных частиц [2, 5]. Проведение электронномикроскопических исследований позволило обнаружить качественные изменения внутреннего строения металла при низкотемпературном отпуске после закалки и объяснить характер изменения прочностных и пластических свойств при отпуске (рис. 2).

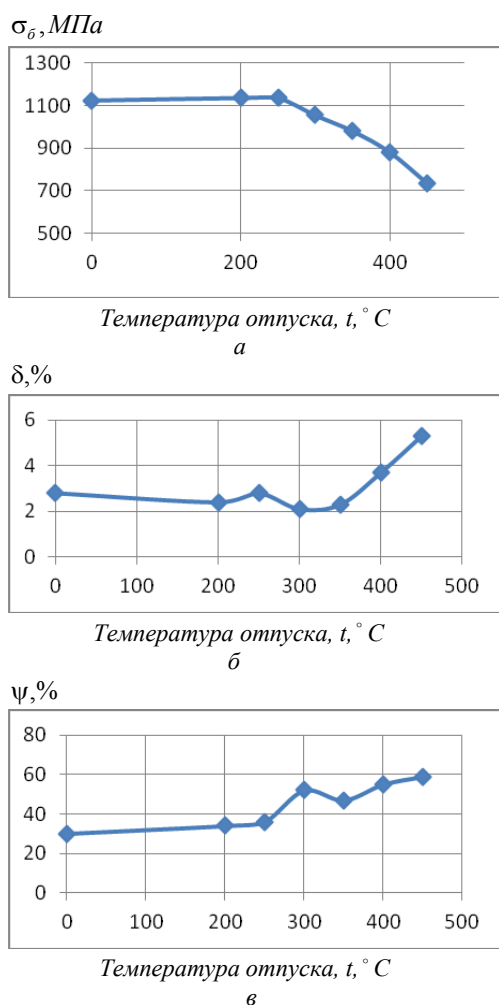


Рис. 2. Влияние температуры отпуска на временное сопротивление (а), относительные удлинение (б) и сужение (в)

Из анализа зависимостей следует, что в процессе отпуска при температурах начиная от 200 °С должно происходить непрерывное выделение атомов углерода из твердого раствора, что подтверждается значениями микротвердости (рис. 3). На основании этого, снижение степени пересыщения твердого раствора атомами углерода приведет к неизбежному разпрочнению стали [9]. С другой стороны, сам процесс выделения атомов углерода обладает двойственным характером влияния на свойства. Во-первых, выделение атомов углерода из октаэдрических положений кристаллической решетки феррита на дислокации будет способствовать дальнейшему их закреплению [8, 9]. По эффекту на прочностные свойства указанный процесс относится к упрочнению [2]. С другой стороны, выделение атомов углерода на дефектах кристаллического строения должно способствовать появлению в металле дополнительного количества карбидных частиц (рис. 4).

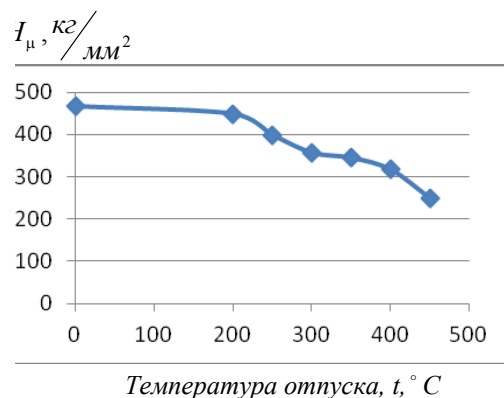


Рис. 3. Изменение микротвердости феррита в зависимости от температуры отпуска закаленной стали



Рис. 4. Структура закаленной стали после отпуска 200 °С  $\times 18000$

Подтверждением приведенных положений являются формируемые карбидные частицы, располагаемые не только на границах раздела, но и во внутренних объемах кристаллитов и двойников. Одновременно с этим происходит сфероидизация частиц цементита, приводя к увеличению количества более равноосных глобул, которые, по-видимому, начали выделяться еще на стадии самоотпуска при мартенситном превращении.

Процессы перехода атомов углерода из твердого раствора сопровождаются снижением внутренних напряжений, о чем свидетельствует уменьшение размытия рефлексов на микродифракционных фотографиях [1] и снижение уширения рентгеновских интерференций (рис. 5).

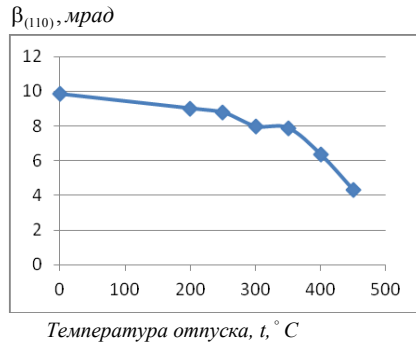


Рис. 5. Влияние температуры отпуска на уширение рентгеновской интерференции (110) феррита

При температурах отпуска до  $400^\circ\text{C}$  обнаруживаются признаки начала перераспределения дислокаций и незначительное снижение их количества. Совместное развитие указанных процессов объясняет наблюдаемое разупрочнение стали при температурах отпуска в интервале  $200\text{--}450^\circ\text{C}$ .

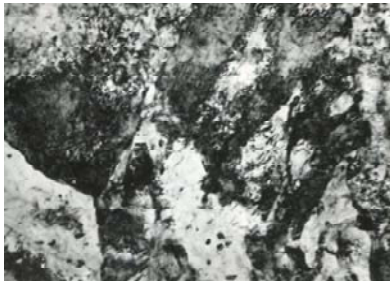


Рис. 6. Структура закаленной стали после отпуска  $400^\circ\text{C}$   $\times 18000$

Полученные результаты свидетельствуют о суммарном вкладе в эффект разупрочнения от снижения степени пересыщения твердого раствора атомами углерода, уменьшения плотности дислокаций и коалесценции цементитных частиц. Источником упрочнения являются процессы старения закаленной стали от взаи-

модействия дислокаций с атомами углерода при распаде твердого раствора и дисперсионного упрочнения от формирования дополнительных частиц цементита.

Анализ полученных результатов показывает, что начиная от температур отпуска  $250\text{--}300^\circ\text{C}$  эффекты разупрочнения в закаленной углеродистой стали начинают превышать над упрочнением от закрепления дислокаций атомами углерода и развития дисперсионного твердения от карбидных частиц.

### Выводы

1. Эффект упрочнения при отпуске закаленной стали обусловлен закалочным старением и дисперсионным упрочнением от выделяющихся частиц цементита.

2. При температурах отпуска выше  $300^\circ\text{C}$  темп снижения прочностных свойств определяется превышением суммарного эффекта разупрочнения от распада твердого раствора, ускорения сфероидизации и коалесценции цементитных частиц над закалочным старением и дисперсионным твердением.

### Список литературы

1. Большаков В. И. Атлас структур металлов и сплавов / Большаков В. И., Сухомлин Г. Д., Погребная Н. Э. – Дн-ск : Gaudeamus, 2001. – 113 с.
2. Бабич В. К. Деформационное старение стали / Бабич В. К., Гуль Ю. П., Долженков И. Е. – М. : Металлургия, 1972. – 320 с.
3. Кинетика превращения аустенита в рельсовых сталях марок М74 и 75ХГСМ при непрерывном охлаждении / В. Г. Ефременко, Ф. К. Ткаченко, С. О. Кузьмин и др. // Вісник ДНУЗТ : Дніпропетровськ, 2009. – № 29. – С. 198–201.
4. Пикеринг Ф. Б. Физическое металловедение и разработка сталей. – М. : Металлургия, 1982. – 184 с.
5. Вакуленко И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / Вакуленко И. А., Большаков В. И. – Дн-ск : Маковецкий, 2008. – 196 с.
6. Вакуленко І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві. – Дн-ск : Маковецький, 2010. – 124 с.
7. Гинье А. Рентгенография кристаллов. – М. : ГИФ-МЛ, 1961. – 604 с.
8. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. – М. : Металлургия, 1968. – 1171 с.
9. Курдюмов Г. В. Превращения в железе и стали / Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р.И. – М. : Металлургия, 1977. – 236 с.

Одержано 19.03.2015

### Вакуленко І.О., Перков О.М., Болотова Д.М. Зміна структури і властивостей при відпуску загартованої середьовуглецевої сталі

*Розглянуті питання зміни структури і властивостей при відпуску загартованої на мартенсит середьовуглецевої сталі. При температурах відпуску від  $250\text{--}300^\circ\text{C}$  ефекти пом'якшення в загартованій вуглецевій сталі перевищують вплив від закріплення дислокацій атомами вуглецю і розвитку процесів дисперсійного зміцнення.*

**Ключові слова:** структура, мартенсит, цементит, сталь, гартування, відпуск.

### Vakulenko I., Perkov O., Bolotova D. Change of structure and properties at tempering of quenched medium-carbon steel

*The questions change of structure and properties are considered at tempering of quenched on martensite medium-carbon steel are considered. At the temperatures of tempering from  $250\text{--}300^\circ\text{C}$  effects of softening in quenching carbon steel exceed influence from block of dislocations with atoms of carbon and development of processes dispersion hardening.*

**Key words:** structure, martensite, cementite, steel, quenching, tempering.