

Жолдошов Б.М., Муратов В.С.

**ТЕРМОЦИКЛДИК ИШТЕТҮҮДӨГҮ ЭРИТМЕЛЕРДИН ИЧКЕ
ТҮЗҮМҮН ИЗИЛДӨӨ**

Жолдошов Б.М., Муратов В.С.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ ПРИ
ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

B.M. Zholdoshev, V.S. Muratov

**INVESTIGATION OF THE THEN STRUCTURE OF ALLOYS
DURING THERMAL CYCLING**

УДК: 669.01 (075.8)

Макалада субкритикалык аймактарда сугарылган болотторду ысытуу ылдамдыгы $\alpha \leftrightarrow \gamma$ – айлануусунда данчалардын майдаланышы анча жогору эмес абалы изилденген. Ысытууну төмөндөткөндө субкритикалык аймакта анча да болсо полигоналдык структура өркүндөлөт. Субкритикалык аймактарда сугарылган болотторду ысытуу ылдамдыгы $\alpha \leftrightarrow \gamma$ – айлануусунда данчалардын майдаланышы анча жогору эмес абалы изилденген. Ысытууну төмөндөткөндө субкритикалык аймакта анча да болсо полигоналдык структура өркүндөлөт. Эксперименталдык тажрыйбалардын натыйжасында цикл сандарынын көбөйүшү $\gamma \rightarrow \alpha$ айлануусунун бир салмактуу мүнөздөмөсүн далилдейт. Аустенитти термоциклдик иштетүүдөгү фазалык наклеп кубулушу мартенситтин бекемдүүлүгүнүн жаралуусунда чоң деле ролду ойнобойт.

Негизги сөздөр: термоциклдик, жылуулук, туруктуулук, катуулук, аустенит, таралуу, айлануу, легирилөө, жыштытуу.

В статье исследовано влияние скорости нагрева закаленной стали в субкритической области на возможность измельчения зерна при $\alpha \leftrightarrow \gamma$ при превращении. При замедлении нагрева в субкритической области совершенствуется лишь полигональная структура. Экспериментальные данные доказывают более равновесный характер $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращения при увеличении числа циклов. Отмечено, что фазовый наклеп аустенита при термоциклической обработке не играет особой роли в формировании прочности мартенсита.

Ключевые слова: термоциклирование, теплостойкость, твердость, аустенит, распад, форсированное охлаждение, легирование, отжиг.

It is investigated that the effect of the heating rate of the hardened steel in the subcritical region on the possibility of grain refinement during conversion is insignificant. When the heating is slowed down in the suborbital region. Only the polygonal structure is improved. Experimental data prove a more equilibrium nature of $\alpha \leftrightarrow \gamma$ transformation with increasing number of cycles. It is noted that the phase hardening of austenite in thermocyclic treatment does not play a special role in the formation of martensite strength.

Key words: thermo cycling, thermal endurance, hardening, austenite, forced cooling, transforming, alloying, annealing.

Экспериментальные данные, полученные авторами [1-4] показывают, что процесс кристалло-геометрического соответствия между α и γ фазами при нагреве стали наблюдаться независимо от исходной структуры и скорости нагрева. На основе этого образуются условия для восстановления зерна при фазовой перекристаллизации стали. Однако на практике перекристаллизация при $\alpha \leftrightarrow \gamma$ превращениях «зерно в зерно» нередко нарушается, а причиной вышеуказанного являются нарушения строения межфазной границы вследствие перераспределения дислокаций, легирующих элементов, их накопления, а также процессы рекристаллизации, полигонизации и растворения избыточных фаз.

Заметим, что нахождения ориентационного соответствия растущих фаз не обязательно требует их когерентности. Если брать, что в последнем случае между фазами возникают большие упругие напряжения, когерентность чаще всего заменяется частичной когерентностью границ. Вследствие полного срыва когерентности и роста аустенитного зародыша диффузионным путем была установлена при прямом наблюдении фольг в процессе нагрева в колонне микроскопа [4].

Данные научной работы [2] показывают, что влияние скорости нагрева закаленной стали в субкритической области на возможность измельчения зерна при $\alpha \leftrightarrow \gamma$ - превращении незначительно. При медленном нагреве в субкритической области совершенствуется лишь полигональная структура, заключительное влияние имеет скорость нагрева в межкритическом интервале.

Показано Счастливым В.М., с сотрудниками [5], ориентационное соответствие зародышей мартенсита и аустенита имеет место при любых скоростях нагрева. При медленном нагреве в межкритической области ориентация сохраняется до

полного завершения $\alpha \rightarrow \gamma$ – превращения. Ускоренный нагрев в верхней части межкритического интервала формируют «белые поля» – участки «глобулярного» аустенита.

Благоприятные условия для рекристаллизации аустенита достигается при медленном нагреве в субкритической и быстром – в межкритической области. Однако, тут благоприятную роль играет полигонизация и выделение мелких избыточных фаз – карбидов. С этой точки зрения становится понятной необходимость кратковременных отпусков с последующим резким охлаждением при термоциклической обработке (ТЦО), включающих кратные закалки [6]. На возможность наследования полигонизованной в процессе отпуска структуры указывалось в работе Бернштейна М.Л., с сотрудниками [7]. При нагреве до температур $\sim 500 \dots 600$ °С и кратковременной выдержке протекает полигонизация и из матрицы выделяются дисперсные карбиды. При быстром охлаждении с температуры отпуска облегчается срыв когерентности на границе матрица – карбид, несколько увеличивается плотность дислокаций и вакансий, вновь образовавшихся взамен аннигилировавших при отпуске. Вышеуказанный процесс ускоряет $\alpha \rightarrow \gamma$ – переход, облегчает формирование новых центров рекристаллизации, а также позволяет получить в матрице повышенную плотность дислокаций. Целесообразность указанной обработки согласуется с обнаруженным в работе [8] существованием «пороговой» температуры отпуска после закалки, при нагреве выше которой зерно при последующем нагреве под закалку восстанавливается. Так нагрев выше температуры 650°С и выдержка до 5 ч при промежуточном отпуске сталей с различным содержанием углерода и легирующих элементов приводит к восстановлению зерна, в то время как аналогичный нагрев ниже температуры 600°С приводит к измельчению зерна. У стали такое поведение можно объяснить различным структурным состоянием матрицы перед $\alpha \rightarrow \gamma$ - превращением. Высокая температура отпуска формирует более совершенную структуру матрицы с крупными избыточными фазами, а проникшая полигонизация приводит к получению крупных ячеек. В участках с повышенной плотностью дислокаций протекает рекристаллизация, оно приводит к резкому уменьшению числа центров зарождения аустенита, что способствует восстановлению зерна. Уместно было бы отметить, что низкотемпературный (ниже 400 °С) отпуск также препятствует восстановлению исходного зерна при малых и высоких скоростях нагрева. Здесь, для промежуточных скоростей нагрева процесс отпуска влияет более затруднительно [9]. Это указывает на то, что для измельчения или восстановления зерна при $\alpha \rightarrow \gamma$ – переходе необходимо получить определенную структуру, зависящую от скорости нагрева. Существенную роль при этом играет наличие когерентной связи их с матрицей, однако, их роль не определя-

ющая. В частности, влияние характера распределения карбидов сводится не к изменению ориентированного характера $\alpha \rightarrow \gamma$ – превращения, а к изменению склонности к рекристаллизации матрицы, как до $\alpha \rightarrow \gamma$ – перехода, так и после него в нижнем интервале температур. Поэтому в некотором интервале температур сохраняется исходное зерно α – фазы.

Особо крупные некогерентные фазы – не мешают рекристаллизационным процессам при обычных скоростях нагрева. Поэтому можно понять, почему после выполнения двух закалок наблюдается вторичная рекристаллизация при повышении температуры второй закалки. Стабилизирующая обработка, проводимая при ТЦО с диффузионными фазовыми переходами, приводит к образованию грубых некогерентных карбидов, которые не мешают первичной рекристаллизации. Увеличение числа циклов $\alpha \leftrightarrow \gamma$ - диффузионных превращений приводит к измельчению зерна, увеличению их однородности по размерам и следовательно к стабильности в нижнем интервале температур. С повышением же температуры вновь становится возможной вторичная рекристаллизация из-за движения особых границ или рассеяния малоугловых границ.

В результате повторных закалок и нормализация из межкритической области изменяется морфология аустенитного превращения. Первый нагрев выше A_{c1} (но ниже A_{c3}) формируют отдельные крупные участки – фазы. При повторных нагревах аустенит образуется по границам зерен феррита, причем количество образующегося аустенита уменьшается по сравнению с первым циклом.

Приведенные значения согласуются с результатами научных работ [10-12]. Так в работе [10] отмечается, что при последующих циклах в стали 15Х аустенита образуется в 2-3 раза меньше, чем после первого нагрева. При повторных нормализациях с нагревами выше $A_{c1} + 50$ °С структура получается более неоднородной. В исследовании [11] показано, что повторные циклы $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перехода с закалками в воде и нагревом в интервал $A_n - A_k$ приводит с ростом числа циклов к стабилизации - фазы и торможению $\alpha \rightarrow \gamma$ – перехода при нагреве. Так в стали 03Х12Н7КМ, которая содержала 96% мартенсита после предварительной закалки с 1150°С ($\tau = 3,5$ ч.), после первого превращения при температуре 680 °С получено 75 % аустенита, а после пятого 40%. Экспериментальные данные доказывают более равновесном характере $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении при увеличении числа циклов.

Авторами исследования [11] показано, что фазовый наклеп аустенита при ТЦО не играет особой роли в формировании прочности мартенсита, и относит некоторое упрочнение за счет измельчения структуры при рекристаллизации аустенита.

В научной работе [12] анализируется поведение мартенситно-старяющей стали 04Х14К13НЧМЗТ-ВД, в итоге не обнаружили изменения количества аустенита при повторном нагреве до 680-750°С

стали. Однако при увеличении числа циклов и здесь наблюдалось резкое уменьшение количества образовавшегося аустенита. При этом аустенита образуется меньше тогда, когда при закалке охлаждали до комнатной температуры, а не до -186°C .

Электронно-микроскопические исследования фольг показал, что после повторных закалок с различных температур нагрева в интервале $A_n - A_k$ стали ЭП 767 - ВД предварительно закаленной с 1050°C , $\alpha \rightarrow \gamma$ – превращение осуществляется по-разному в зависимости от температуры нагрева. На начальных этапах $\alpha \rightarrow \gamma$ – превращения при 560°C аустенит образуется преимущественно по границам мартенситных реек и субзерен. С повышением температуры до 600°C образуется преимущественно междуручная α фаза, которая в ходе своего роста поглощает внутри реечные образования аустенита, и в структуре возникает полосчатость. С повышением температуры нагрева и числа циклов идет фрагментация структуры: вместо глобулярных частиц образуются сначала полосчатые участки аустенита, а затем идет измельчение полос аустенита и мартенсита.

В научной работе [13] показано: в мартенситно-старееющей стали Н17К15В9М первичная рекристаллизация начинается при температуре 800°C лишь при нагреве со скоростью 1 К/с . Границы бывших аустенитных зерен в процессе ТЦО (в котором после нагрева осуществлялось охлаждение на воздухе) качественно не меняются, а в стали Н9К15В9М12 накапливаются крупные частицы размером в 1 мкм – фазы Лавеса Fe_2Mo . Содержание стабилизированного аустенита растет в стали Н17К15В9М монотонно с числом циклов только при скорости нагрева 50 К/с , тогда, как при скорости 1 К/с количество – фазы увеличивается лишь в первые три цикла, а в дальнейшем не меняется. В стали Н9К15М12 с ростом числа циклов количество аустенита не меняется, начиная со второго цикла, и это независимо от скорости нагрева. С повышением количества никеля в стали доля стабилизированного аустенита увеличивается.

Заключение:

– Экспериментальные данные структурных изменений у стали IX18Н9Т при термоциклической обработке в интервале температур $1050 \leftrightarrow 600^{\circ}\text{C}$ с реализацией диффузионных $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращений, выполненные в научной работе [9], показывают, что размер зерна меняется немонотонно. Предварительно после двух циклов состояния зерна укрупняется (время выдержки 2 мин при температуре 600°C), затем подрастают при числе циклов $n = 5$, а после $n = 15$ зерно измельчается.

– С изотермической выдержки продолжительностью $20\text{--}75\text{ мин}$ при температуре 600°C способствует укрупнению зерна по сравнению с исходным

структурным состоянием, а при времени выдержки $t = 3\text{ ч}$ – зерно измельчается. Рисунок (текстура) первоначально (после двух циклов $n = 2$) исчезает, а затем вновь восстанавливается. Наблюдается периодические процессы упрочнения (твердость растет) и разупрочнения (твердость снижается).

Литература:

1. Садовский В.Д. Структурная наследственность в стали [Текст] / В.Д. Садовский. - М.: Металлургия, 1983. - 208 с.
2. Дьяченко С.С., Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах, [Текст] / С.С. Дьяченко. - М.: Металлургия, 1982. - 128 с.
3. Бернштейн М.Л. Структура и свойства мартенситостареющей стали после термомеханической обработки, [Текст] / Бернштейн М.Л., Купуткина Л.М., Прокошкина В.Г., Барганов В.А., Кривоногов Г.С., Ключ А.С. Известия АН СССР. // Металлы. - 1981. - №6. - С.107-111.
4. Бернштейн М.Л. Известия АН СССР [Текст] / Бернштейн М.Л., Капуткина Л.М., Прокошкин С.Д., Остапенко Д.В. // Металлы. - 1982. - №3. - С. 76-88.
5. Ожиганов А.В. Физика металлов и металловедение / [Текст] / А.В. Ожиганов, В.М. Счастливцев, А.М. Полякова, В.Д. Садовский. – 1974. - Т. 37. - №6. - С. 135-141.
6. Кенис М.С. Способ обработки изделий из алюминиевых сплавов, [Текст] / Кенис М.С., Трошина Л.В., Якубович Е.А., Губарева В.А. / А.с. (СССР), №1039980, Авт.изобр. //Заяв. 14.05.86. №3435468. Оpubл. 10.05.1988. В Б.И. №9.
7. Федюкин В.К., Влияние термоциклической обработки на структуру и механические свойства железографитовых спеченных материалов. [Текст] /Федюкин В.К., Лебедев Т.А., Манукян Г.Б., Манукян Н.В. / В сборнике Термоциклическая обработка деталей машин. - Волгоград, 1991. - С. 37- 40.
8. Middlton C.J., Met. Sci., [Текст] / Middlton C.J., G.W. Form // 1975, №9. p.521 - 530.
9. Морозов О.П., О фазовой структурной перекристаллизации в некоторых конструкционных сталях, [Текст]/ Морозов О.П., Штейнберг М.М., Попова Т.А., Макаров И.О. // В сборнике: Вопросы производства и обработки стали, №229, Челябинский политехнический институт. - Челябинск, 1999. - С. 99-102.
10. Дьяченко С.С. Особенности влияния холодной деформации и ТЦО на структуру и свойства низколегированных сталей, [Текст] / Дьяченко С.С., Кузьменко Б.А. // В сборнике: Термоциклическая обработка металлических изделий. - Л.: Наука, 1992. - С. 18-19.
11. Маслакова Т.М. Влияние ТЦО с нагревами в интервале двухфазной области на свойства нержавеющей мартенситностареющей стали, [Текст] / Т.М. Маслакова. / В сборнике: Термоциклическая обработка металлических изделий - Л.: Наука, 1992. - С.52-56.
12. Масютин В.А. Термоциклическая стабилизация аустенита в нержавеющей мартенситностареющей стали, [Текст]/ Масютин В.А., Рахштадт А.Г. / В сборнике: Термоциклическая обработка металлических изделий. - Л.: Наука, 1992. - С. 48-50.
13. Абрамов О.В., Структура аустенита и механические свойства высокопрочных мартенситостареющих сталей после ТЦО, [Текст] / Абрамов О.В., Ильин А.И. / В сборнике Термоциклическая обработка металлических изделий. - Волгоград, 1991. - С.73-81.

Рецензент: д.т.н., профессор Кенжаев И.Г.