

М.Ф.Евсюков, И.А.Кривошеева

### КИНЕТИКА БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННОЙ МОЛИБДЕНОМ

Целью работы является изучение кинетики превращения переохлажденного аустенита в большом интервале скоростей охлаждения стали 32ХМА–3. Установлено, что легирование молибденом среднеуглеродистой стали, резко повышает устойчивость аустенита при его диффузионном распаде, сдвигая область распада на перлит и феррит в сторону малых скоростей охлаждения. Показано, что область распада аустенита на бейнит отделена от области распада на перлит. Бейнитное превращение реализуется в очень большом интервале скоростей охлаждения в интервале температур  $530^{\circ} - 335^{\circ}\text{C}$  с образованием, в основном, продуктов распада зернистого строения.

**среднеуглеродистая сталь, легирование молибденом, охлаждение, диффузионный распад, устойчивость аустенита**

**Постановка задачи.** На ОАО «Синарский трубный завод» для изготовления обсадных труб применяется новая с повышенным содержанием молибдена сталь 32ХМА–3. Однако, систематические исследования структурных и фазовых превращений в большом интервале скоростей охлаждения, в том числе и после закалки в воде, до настоящего времени отсутствуют [1,2]. В связи с этим, выполнена работа по изучению кинетики превращения переохлажденного аустенита в большом интервале скоростей охлаждения стали 32ХМА–3, изготовленной по ТС–102–143–2003. Плавочный химический состав стали следующий: 0,36%С, 0,83%Мп, 0,42% Si, 0,004% S, 0,014%Р, 0,86% Cr, 0,37 Ni, 0,045%Si, 0,031 Al , и 0,55% Mo.

**Методика исследования.** Кинетика превращения аустенита после отдельного нагрева  $900 - 20\text{мин.}$  изучалась в большом интервале скоростей охлаждения на dilatометрах АД–80 и МД–83 конструкции Института черной металлургии НАН Украины, г.Днепропетровск. Образцы диаметром 4 мм после нагрева до  $900^{\circ}\text{C}$  и выдержки 20 мин. охлаждали в интервале скоростей охлаждения от  $16,4^{\circ}\text{C/с}$  до  $0,02^{\circ}\text{C/с}$ . По термограмме определяли среднюю скорость охлаждения в интервале температур  $A_{c3}$  и Мн. По перегибам на dilatограммах – температуру начала и конца фазового превращения. Строение продуктов распада изучали микроструктурным методом на dilatометрических образцах после различных скоростей охлаждения на микроскопе НЕОФОТ–2. Шлифы травили 4% ниталем. Процентное содержание структурных составляющих определяли на приборе ЭПИКВАНТ. Результаты исследования кинетики фазовых превращений при непрерывном охлаждении обобщены в виде термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита стали 32 ХМА –3 (Рис.1).

**Изложение основных материалов исследования.** Критические точки стали 32ХМА–3 с 0,36% С, 0,83% Мн, 0,86% Сг и 0,55% Мо, определенные при нагреве со скоростью 200° С/час, равны:  $A_{c1} - 755^{\circ}\text{C}$  и  $A_{c3} - 810^{\circ}\text{C}$ . Повышенная температура  $A_{c1}$  обусловлена повышенной энергией диссоциации цемента, легированного молибденом. [3].

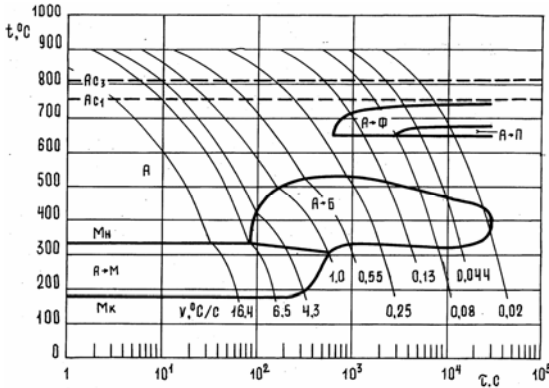


Рис.1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита стали 32ХМА после нагрева  $900^{\circ}\text{C} - 20$  мин.

Анализ термокинетической диаграммы и микроструктурные исследования образцов показали следующее:

при скоростях охлаждения выше  $6,5^{\circ}\text{C/с}$  переохлажденный аустенит превращается с образованием мартенсита. Температура начала мартенситного превращения при скорости охлаждения  $16,4^{\circ}\text{C/с}$  равна  $330^{\circ}\text{C}$ , конец распада зафиксирован при температуре  $180^{\circ}\text{C}$ . Выделение значительного количества тепла при образовании мартенсита приводит к замедлению скорости охлаждения образца. Второй особенностью распада переохлажденного аустенита является неравномерная скорость образования мартенсита в процессе охлаждения. Так, при охлаждении со скоростью  $6,5^{\circ}\text{C/с}$  50% мартенсита образуется при охлаждении до  $280^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшем охлаждении скорость распада переохлажденного аустенита на мартенсит уменьшается, оканчивается распад аустенита только при температуре  $180^{\circ}\text{C}$ . Мартенситная структура образцов, охлажденных со скоростями  $16,4^{\circ}\text{C/с}$  и  $6,5^{\circ}\text{C/с}$  имеет, в основном, реечное строение.

В интервале скоростей охлаждения от  $6,5^{\circ}\text{C/с}$  до  $1,0^{\circ}\text{C/с}$  переохлажденный аустенит распадается на бейнит и мартенсит. Температура начала образования бейнита при скорости охлаждения  $4,3^{\circ}\text{C/с}$  повышается до  $420^{\circ}\text{C}$ , а при скорости охлаждения  $1^{\circ}\text{C/с}$  она уже равна  $490^{\circ}\text{C}$ . При этом, степень распада на бейнит увеличивается и при скорости охлаждения  $1^{\circ}\text{C/с}$  составляет 90–95%. Микроструктура стали после охлаждения со скоростью  $4,3^{\circ}\text{C/с}$  состоит из 20% бейнита и 80% мартенсита, а после охлаждения со скоростью  $1^{\circ}\text{C/с}$  содержание мартенсита понижается до 3–5%. В этом случае образуется, в основном, нижний бейнит в виде темнотравящихся темных полос (рис.1,а). Механизм образования таких структур описан в работе [4]. Распад переохлажденного аустенита только на бейнит наблюдается в широком интервале скоростей охлаждения от  $1^{\circ}\text{C/с}$  до

0,20<sup>0</sup>С/с. При этом, температура начала распада аустенита на бейнит повышается с 490<sup>0</sup> С до 530<sup>0</sup>С. Температура конца распада аустенита также повышается от 305<sup>0</sup>С до 335<sup>0</sup>С. Бейнит имеет неоднородное зернистое строение (рис.2,б). Механизм и кинетика образования зернистого бейнита описаны в работах [5,6]. При этом скорость распада аустенита на бейнит при температурах ниже 530<sup>0</sup>С за счет понижения коэффициента диффузии углерода понижается. Максимальная скорость распада аустенита реализуется при температурах выше 450<sup>0</sup>С. С понижением температуры до 380<sup>0</sup>С образуется 95% бейнита. Остальные 5% остаточного аустенита распадаются только в процессе охлаждения до 335<sup>0</sup>С. Аналогичная кинетика распада аустенита на бейнит описана и в работе [7].

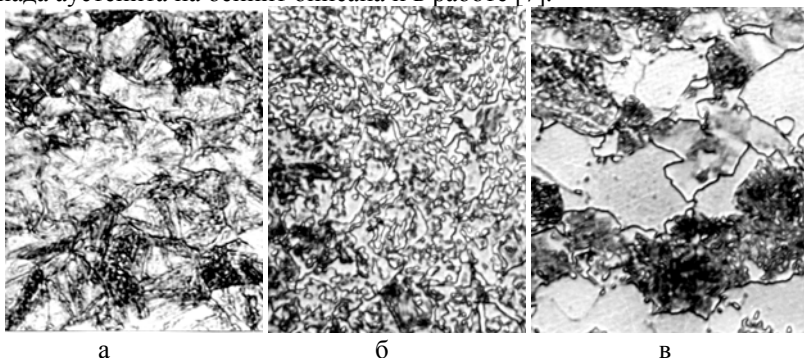


Рис.2. Микроструктура стали 32ХМА-3 после нагрева 900<sup>0</sup>С – 20 мин. и охлаждения со скоростью: а – 4,3<sup>0</sup>С/с, б – 2,7<sup>0</sup>С, в – 0,16<sup>0</sup>С/с., х500.

Феррито–перлитные структуры в стали образуются при скоростях охлаждения ниже 0,25<sup>0</sup>С/с. В интервале скоростей охлаждения от 0,20<sup>0</sup>С/с до 0,08<sup>0</sup>С/с переохлажденный аустенит начинает распадаться по диффузионной кинетике на феррит. Первые мелкие зерна феррита обнаруживаются на границах зерен в образцах, охлажденных со скоростью 0,20<sup>0</sup>С/с. С уменьшением скорости охлаждения до 0,13<sup>0</sup>С/с температура начала распада аустенита повышается до 715<sup>0</sup>С, а степень распада увеличивается до 5–10%. При скорости охлаждения 0,08<sup>0</sup>С/с температура начала распада на феррит повышается до 735<sup>0</sup>С, а степень распада до 20%. При охлаждении до температуры 650<sup>0</sup>С наблюдается приостановка распада переохлажденного аустенита на феррит. Оставшийся аустенит в процессе дальнейшего охлаждения распадается на бейнит. При этом, температура начала распада на бейнит с уменьшением скорости охлаждения от 0,25<sup>0</sup>С/с до 0,08<sup>0</sup>С/с понижается с 530<sup>0</sup>С до 490<sup>0</sup>С, температура конца распада аустенита находится в интервале температур 330–340<sup>0</sup>С. Феррит имеет в основном, равноосную форму, а бейнит образуется только в мелких зернах остаточного аустенита и имеет светлую однородную травимось без признаков фрагментации.

Перлитная структура образуется из переохлажденного аустенита при скоростях охлаждения ниже  $0,08^{\circ}\text{C}/\text{с}$  ( $500^{\circ}\text{C}/\text{час}$ ). Первые участки перлита в процессе охлаждения со скоростью  $0,08^{\circ}\text{C}/\text{с}$  образуются при температуре  $650^{\circ}\text{C}$ . С уменьшением скорости охлаждения до  $0,044^{\circ}\text{C}/\text{с}$  температура начала распада аустенита на перлит повышается до  $670^{\circ}\text{C}$  и продолжается при охлаждении до  $650^{\circ}\text{C}$ . Степень распада аустенита по диффузионной кинетике на феррит и перлит равна 70%. Микроструктура стали состоит из преимущественно равноосных зерен феррита, темнотравящихся зерен перлита, а бейнит при скоростях охлаждения  $0,044 \cdot 10^{-6} 1/\text{град}$ , и ниже образуется только в мелких зернах остаточного аустенита и имеет светлую однородную травимость без признаков фрагментации. (Рис.1,в). При минимальной скорости охлаждения равной  $0,02^{\circ}\text{C}/\text{с}$  ( $75\% \text{C}/\text{час}$ ) в интервале температур  $740\text{--}675^{\circ}\text{C}$  образуются крупные зерна феррита. При дальнейшем охлаждении в интервале температур  $675\text{--}650^{\circ}\text{C}$  переохлажденный аустенит распадается с образованием крупных и равноосных зерен перлита. Общая степень распада равна 95%. Оставшийся аустенит при дальнейшем охлаждении распадается на бейнит. Температура начала распада на бейнит понижается с  $490^{\circ}\text{C}$  при скорости охлаждения  $0,08^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $445^{\circ}\text{C}$  при скорости охлаждения  $0,02^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . Температура конца распада аустенита на бейнит повышается с  $330^{\circ}\text{C}$  до  $370^{\circ}\text{C}$ . Микроструктура стали состоит из крупных зерен феррита и перлита, бейнит присутствует в виде отдельных слаботравящихся участков. При скоростях охлаждения ниже  $0,02^{\circ}\text{C}/\text{с}$  /  $75\% \text{C}/\text{час}$  / переохлажденный аустенит распадается только по диффузионной кинетике с образованием крупных зерен феррита и перлита равноосной формы.

Таким образом, в исследованной трубной стали 32ХМА–3 после нагрева до  $900^{\circ}\text{C}$  и выдержки 20 мин в зависимости от скорости охлаждения образуются следующие структуры.

Мартенситная структура образуется из переохлажденного аустенита при скоростях охлаждения выше  $6,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  в интервале температур  $330\text{--}180^{\circ}\text{C}$ . Смешанная структура, состоящая из бейнита и мартенсита в различном процентном соотношении образуется из аустенита в интервале скоростей охлаждения от  $6,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $1^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и интервале температур  $490\text{--}180^{\circ}\text{C}$ .

Бейнитная структура наблюдается в образцах, охлажденных в интервале скоростей охлаждения от  $1^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $0,20^{\circ}\text{C}/\text{с}$  и температур  $530\text{--}330^{\circ}\text{C}$ . Смешанная структура, состоящая из феррита и бейнита наблюдается в исследованной стали после охлаждения в интервале скоростей охлаждения от  $0,20^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $0,08^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . При этом, с уменьшением скорости охлаждения до  $0,08^{\circ}\text{C}/\text{с}$  содержание бейнита за счет частичного распада на феррит уменьшается до 75%.

Смешанная структура, состоящая из феррита, перлита и бейнита наблюдается в исследованной стали после охлаждения в интервале скоро-

стей охлаждения от  $0,08^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до  $0,02^{\circ}\text{C}/\text{с}$ . При этом, при скорости охлаждения  $0,02^{\circ}\text{C}/\text{с}$  образуется 95% феррита и перлита и 3–5% бейнита.

Структура, состоящая только из феррита и перлита, образуется при всех скоростях охлаждения ниже  $0,02^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

Критические точки исследованной стали равны:  $A_{c1} - 755^{\circ}\text{C}$ ,  $A_{c3} - 810^{\circ}\text{C}$ . Температура начала мартенситного превращения при скоростях охлаждения выше  $6,5^{\circ}\text{C}/\text{с}$  равна  $330^{\circ}\text{C}$ , заканчивается мартенситное превращение при  $180^{\circ}\text{C}$ .

Повышенное содержание молибдена в исследованной стали, равное 0,55%, обусловило высокую устойчивость переохлажденного аустенита, что привело к значительному смещению вправо области распада на феррит и перлит, образованию высокой устойчивости аустенита в температурном интервале  $650\text{--}530^{\circ}\text{C}$ . Это обусловлено по данным работ [8,3] тем, что молибден за счет понижения коэффициента диффузии углерода и самодиффузии атомов железа значительно уменьшает скорость зарождения и роста перлитных колоний. Однако, Мо мало влияет на кинетику превращения переохлажденного аустенита, протекающего по бездиффузионной кинетике с образованием мартенсита [8,с.781], так как мало влияет на энергию упругой деформации  $\alpha$  – фазы. Это обусловило возможность получения мартенсито–бейнитных структур в большом интервале скоростей охлаждения. Аналогичная кинетика распада аустенита на бейнит была выявлена и в ранее выполненной работе [2,с.314]. Показано, что в сложнoleгированных сталях с 0,39% С и 0,51% Мо перлитное превращение отделено от бейнитного в интервале температур  $420\text{--}540^{\circ}\text{C}$ . Кроме этого показано, что бейнитное и мартенситное превращение протекают в узком интервале скоростей охлаждения. А возможность распада аустенита в широком интервале скоростей охлаждения с образованием 100% бейнита в сложнoleгированной стали с 0,28% С, 0,49% Мо была показана в работе [2, с.315]. При этом, бейнитное превращение также реализуется в очень широком интервале скоростей охлаждения.

**Выводы.** Бейнитно – мартенситное превращение реализуется в очень узком интервале скоростей охлаждения. Установлено, что в интервале скоростей охлаждения  $1^{\circ}\text{C} - 0,20^{\circ}\text{C}/\text{с}$  переохлажденный аустенит ниже  $530^{\circ}\text{C}$  распадается на 100% с образованием только бейнита. Бейнитное превращение отделено от перлитного превращения температурным интервалом высокой устойчивости. При смешанной схеме распада с уменьшением скорости охлаждения температура начала распада аустенита на бейнит понижается с  $530^{\circ}\text{C}$  до  $430^{\circ}\text{C}$ . Критические точки за счет Мо и Сг повышены по сравнению с углеродистой сталью и равны  $A_{c1} - 755^{\circ}\text{C}$  и  $810^{\circ}\text{C}$ . В процессе охлаждения ниже  $530^{\circ}\text{C}$  скорость распада аустенита на бейнит имеет затухающий эффект. Максимальная скорость распада аустенита на бейнит наблюдается в интервале температур  $530\text{--}450^{\circ}\text{C}$ . При этом, 95% бейнита образуется при охлаждении до температуры  $350^{\circ}\text{C}$ . Температура конца бейнитного превращения при смешанной кинетике

распада аустенита лежит при температуре выше температуры начала мартенситного превращения. Микроструктурными исследованиями установлено, что феррит имеет, в основном, полиэдрическую форму, перлит имеет сорбитообразное строение, бейнит имеет строение близкое к зернистому с разной степенью дисперсности продуктов распада [7], а мартенсит имеет слабо выраженное игольчатое строение. Таким образом, повышенное содержание молибдена до 0,55% в среднеуглеродистой стали способствует образованию бейнитной структуры в большом интервале скоростей охлаждения, что позволяет использовать ее для изготовления деталей в машиностроительной, металлургической, транспортной и строительной областях с высоким комплексом механических и эксплуатационных свойств

1. Попов А.А., Попова А.Е. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. – М – С: Машгиз, 1961. – 430с.
2. Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана. Справочник термиста. – М.: Металлургия, 1991. – 503с.
3. Меськин. В.С. Основы легирования стали. – М: Металлургия, 1964. – 684с.
4. Браун М.Е. Металловедение и термическая обработка. – М: Машгиз, 1963. – С.167.
5. Металлография железа. Том 1 Основы металлографии (с атласом микрофотографий). Под редакцией Ф.Н.Тавадзе. – М.: Металлургия, 1972. – С.78.
6. Гуляев А.П. Металловедение. – М: Металлургия, 1977. – С. 270
7. Гуляев А. П. Термическая обработка стали. – М: Машгиз, 1960. – С. 82.
8. Гудремон. Э. Специальные стали. Том 2. – М: Металлургия, 1966. – С.779–781.

*Статья рекомендована к печати:  
Заместитель ответственного редактора  
раздела «Металловедение и материаловедение»  
докт.техн.наук, проф. В.В.Парусов*

***М.Ф.Євсюков, І.А.Кривошеєва***

**Кінетика бейнітного перетворення в середньовуглецевій сталі, легованій молібденом.**

Метою роботи є вивчення кінетики перетворення аустеніту у великому інтервалі швидкостей охолодження сталі 32ХМА–З. Встановлено, що легування молібденом середньовуглецевої сталі різко підвищує стійкість аустеніту при його дифузійному розпаді, зсуюючи область розпаду на перлит і ферит у бік малих швидкостей охолодження. Показано, що область розпаду аустеніту на бейніт відокремлена від області розпаду на перлит. Бейнітне перетворення реалізується у великому інтервалі швидкостей охолодження в інтервалі температур  $530^0 - 335^0\text{C}$  з утворенням, в основному, продуктів розпаду зернистої будови.