

УДК 669.017:621.771.25:669.141.247

В.В.Парусов, И.Н.Чуйко, М.Ф.Евсюков, А.Б.Сычков*, А.И.Сивак**КИНЕТИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В КАТАНКЕ ИЗ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЭЛЕКТРОСТАЛИ Св–08ГНМ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ***ИЧМ НАН Украины, *СЗАО «Молдавский металлургический завод»*

Изучена кинетика фазовых превращений в катанке из непрерывнолитой электростали Св–08ГНМ при непрерывном охлаждении с различными скоростями. Приведена микроструктура и микротвердость стали в зависимости от скорости охлаждения.

Современное состояние вопроса. Для сварки изделий ответственного назначения (газонефтепроводных труб большого диаметра, паропроводов) применяется омедненная низколегированная проволока диаметром 3,0–4,0 мм из стали марки Св–08ГНМ. В качестве заготовки при производстве такой проволоки применяется катанки диаметром 5,5 мм.

В настоящее время на СЗАО «Молдавский металлургический завод» (СЗАО «ММЗ») осваивается выпуск катанки повышенной деформируемости, предназначенной для изготовления сварочной проволоки прямым волочением. При этом микроструктура катанки из стали Св–08ГНМ согласно ТУ–14–1–2003–77 должна быть однородной, подкалка (мартенситные и троостомартенситные участки) не допускаются. Величина действительного зерна катанки должна быть не крупнее номера 5 по ГОСТ 5639.

Методика исследования. В связи с этим необходимо было изучить кинетику превращений аустенита при непрерывном охлаждении в стали Св–08ГНМ и построить термокинетическую диаграмму. Исследование проводилось на образцах из катанки диаметром 5,5 мм следующего химического состава: 0,064% С, 0,78% Мп, 0,25% Si, 0,67% Ni, 0,96% Мо, 0,0074% В, 0,0050% N. Микроструктура исходной катанки, в поперечном сечении состояла, в основном, из равноосных зерен феррита, мелких перлитных зерен (не более 8–12%) и отдельных участков зернистого бейнита. Микротвердость ускоренно охлажденной по технологии СЗАО «ММЗ» катанки составляла 2190–2540 Н/мм², предел прочности – 630 Н/мм².

Кинетику превращений аустенита изучали на дилатометрах АД–80 и МД–83 конструкции ИЧМ НАНУ. Температуру дилатометрических образцов контролировали хромель–алюминиевыми термодарами (диаметр электродов ~ 0,3 мм), приваренными к поверхности образцов. Аустенитизацию дилатометрических образцов осуществляли при 960⁰С и затем их охлаждали: в печах с различной тепловой инерцией, на воздухе, под вентилятором, в масле и в воде. По регистрируемым термограммам определяли среднюю скорость охлаждения образцов, а по дилатограммам – температуру начала и конца фазовых превращений. Термокинетическая диаграмма превращений аустенита в стали Св–08ГНМ представлена на рис. 1.

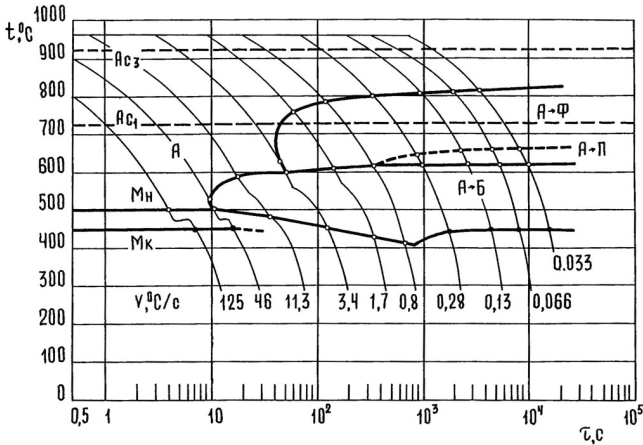


Рис.1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита стали Св-08ГНМ.

Изложение основных материалов исследования. Микроструктурные исследования дилатометрических образцов показали следующее. При скоростях охлаждения выше $46^{\circ}\text{C}/\text{с}$ переохлажденный аустенит распадается по сдвиговому механизму с образованием мартенсита. Так, при скорости охлаждения $125^{\circ}\text{C}/\text{с}$ образование мартенсита начинается при 500°C . В процессе дальнейшего охлаждения при распаде аустенита до 80% выделяется значительное количество тепла, что приводит к уменьшению скорости охлаждения и повышению температуры на 10°C . В процессе дальнейшего охлаждения скорость распада понижается, количество тепла фазового превращения уменьшается, что приводит к понижению температуры образца. При температуре 445°C распад переохлажденного аустенита заканчивается. В этом случае микроструктура образцов состоит из мартенсита 3–5 балла по шкале 3 ГОСТ 8233–56 (рис.2а).

В интервале скоростей охлаждения от $46^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $3,4^{\circ}\text{C}/\text{с}$ переохлажденный аустенит начинает распадаться с образованием бейнита, при этом температура начала распада повышается от 525°C до 600°C , а степень распада увеличивается до 75...80%. Степень распада аустенита на мартенсит уменьшается со 100% до 15–20%. Микроструктура при скорости охлаждения $46^{\circ}\text{C}/\text{с}$ состоит из реечного мартенсита на 95–90% и отдельных участков бейнита до 5–10% (рис.2б). При понижении скорости охлаждения до $11,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температура начала распада аустенита на бейнит повышается до 590°C . Микроструктура образцов, охлажденных со скоростью $11,3^{\circ}\text{C}/\text{с}$, состоит из 65–70% зернистого бейнита и 30–35% мартенсита (рис.2в).

При охлаждении образцов со скоростью $3,4^{\circ}\text{C}/\text{с}$ распад аустенита в интервале температур $630\text{--}600^{\circ}\text{C}$ протекает по диффузионной кинетике с образованием 2–6% феррита. Смена механизма распада аустенита при температурах ниже 600°C на сдвиговый приводит к значительному увеличению скорости и степени распада на бейнит. При этом выделяется значительное количество тепла, которое значительно уменьшает скорость ох-

лаждения образца, что хорошо видно на кривой охлаждения на термокинетической диаграмме.

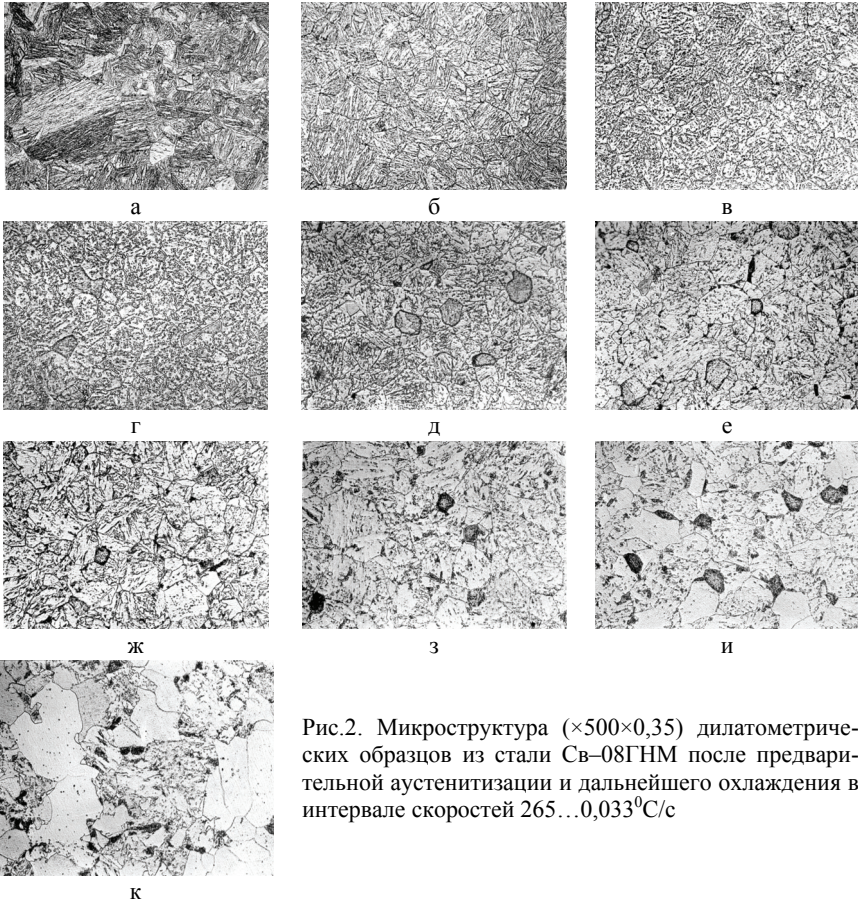


Рис.2. Микроструктура ($\times 500 \times 0,35$) dilatометрических образцов из стали Св-08ГНМ после предварительной аустенизации и дальнейшего охлаждения в интервале скоростей $265 \dots 0,033^\circ\text{C}/\text{с}$

При охлаждении от 600°C до 450°C распадается около 80% аустенита. Оставшийся аустенит при температурах ниже 450°C распадается на мартенсит. Количество мартенсита составляет не более 12–19%. Таким образом, микроструктура образцов, охлажденных со скоростью $3,4^\circ\text{C}/\text{с}$, в основном, на 75–80% состоит из бейнита, 2–6% феррита и отдельных изолированных участков мартенсита (рис.2г).

При уменьшении скорости охлаждения образцов до $1,7^\circ\text{C}/\text{с}$ температура начала распада аустенита повышается до 760°C . Однако, распад аустенита в процессе охлаждения протекает очень медленно и при охлаждении до 610°C распадается всего 6–8% с образованием феррита. При температурах охлаждения ниже 610°C аустенит распадается по сдвиговому механизму с образованием бейнита и мартенсита при сохранении ориен-

тационной связи между исходной γ - и образующейся α -фазой. В процессе распада выделяется значительное количество тепла фазового превращения, что и приводит к уменьшению скорости охлаждения образца в 1,5–2 раза. В процессе охлаждения до 500°C образуется 84–86% бейнита. Однако, при дальнейшем охлаждении скорость распада значительно уменьшается и при температуре 430°C распад аустенита заканчивается. Наличие в микроструктуре отдельных слаботравящихся участков свидетельствует о том, что отдельные участки остаточного аустенита распались на мартенсит. Таким образом, микроструктура образцов, охлажденных со средней скоростью $1,7^{\circ}\text{C}/\text{с}$, на 85–88% состоит из зернистого бейнита, отдельных зерен феррита (6–8%) и мартенсита в виде отдельных участков (рис.2д).

При уменьшении скорости охлаждения образцов до $0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температура начала распада аустенита повышается до 780°C . Однако, в процессе дальнейшего охлаждения распад аустенита протекает очень медленно и при охлаждении до температуры 615°C образуется всего 10–12% феррита и отдельных зародышей перлита по границам бывших аустенитных зерен. Изменение механизма распада аустенита приводит к значительному увеличению скорости его превращения, в результате чего при охлаждении до 500°C степень распада аустенита достигает 80–85%. При температурах охлаждения ниже 500°C скорость распада остаточного аустенита значительно уменьшается, что и приводит к понижению температуры конца распада аустенита до 420 – 410°C . Таким образом, микроструктура стали Св–08ГНМ после охлаждения со скоростью $0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ на 80–85% состоит из бейнита, содержание феррита не более 10–12%. При этом, бейнит имеет, в основном, зернистое строение (рис.2е). Ферритные зерна имеют пятнистое строение обусловленное наличием мелких зерен структурно свободного цементита. Наличие отдельных слаботравящихся зерен меньше 3% дает основание предполагать, что отдельные зерна остаточного аустенита в ликвационных участках распадаются с образованием мартенсита.

При охлаждении со средней скоростью $0,28^{\circ}\text{C}/\text{с}$ распад аустенита в образцах начинается при температуре 800°C . В процессе охлаждения распад аустенита на феррит продолжается до температуры 640°C . При этом, скорость распада сравнительно мала, т.к. образуется всего 23–25% феррита. При температурах ниже 640°C переохлажденный аустенит распадается как на феррит, так и частично на перлит 3–6%. Перлит наблюдается в виде мелких перлитных зародышей по границам зерен. Общая степень распада аустенита на феррит и перлит при температуре 620°C составила 26–31%. При температурах охлаждения ниже 620°C оставшийся аустенит превращается на бейнит. При этом скорость распада аустенита на бейнит значительно выше чем скорость распада на феррит. Распад аустенита заканчивается при температуре 450°C , содержание бейнита составляет 69–77%. Отсутствие перегибов на дилатограммах при более низких температурах свидетельствует как о полном распаде аустенита при температурах выше 450°C , так и об отсутствии мартенситного превращения при данной

скорости охлаждения. Таким образом, микроструктура образцов состоит из 20–25% феррита, 3–6% перлита и 77–70% бейнита (рис.2ж).

При понижении скорости охлаждения образцов до $0,13^{\circ}\text{C}/\text{с}$ температура начала распада аустенита на феррит практически не изменилась и равна 805°C . В процессе охлаждения до 650°C выделяется 25–30% феррита. При дальнейшем охлаждении аустенит распадается как на феррит, так и на перлит, при температуре 620°C общая степень распада на феррит и перлит составила 35–42%. При дальнейшем охлаждении переохлажденный аустенит распадается по сдвиговому механизму с образованием бейнита. Скорость распада резко увеличивается при охлаждении до температуры 520°C . При дальнейшем охлаждении распад аустенита замедляется и при температуре 450°C распад аустенита заканчивается. При этом образуется около 55–60% бейнита. Влияние тепла фазового превращения аустенита на скорость охлаждения образца как в процессе распада на феррит, так и на бейнит не выявлено. Морфология продуктов распада следующая. Ферритные зерна, как и после скорости охлаждения $0,28^{\circ}\text{C}/\text{с}$, имеют мелкие дисперсные выделения, перлитные колонии более крупные, а бейнит имеет как пакетное, так и зернистое строение (рис.2з).

Дальнейшее понижение скорости охлаждения образцов до $0,066^{\circ}\text{C}/\text{с}$ привело к увеличению степени распада аустенита по диффузионной кинетике. Температура начала распада аустенита на феррит не изменилась и равна $810\text{--}815^{\circ}\text{C}$. В процессе дальнейшего охлаждения до 650°C наблюдается значительный рост скорости распада аустенита до 60–65%. В интервале температур $650\text{--}620^{\circ}\text{C}$ переохлажденный аустенит распадается одновременно на феррит и частично на перлит, общая степень распада составляет 70–77%. Оставшийся переохлажденный аустенит при температурах ниже 620°C распадается на бейнит. И при данной скорости охлаждения скорость распада аустенита на бейнит в 1,5–2 раза выше, чем при распаде на феррит. Заканчивается распад при температурах $450\text{--}460^{\circ}\text{C}$. Таким образом, при скорости охлаждения $0,066^{\circ}\text{C}/\text{с}$ аустенит, в основном, распадается по диффузионной кинетике с образованием 60–65% феррита и 10–12% перлита и только 23–30% аустенита распадается на бейнит. Морфология продуктов распада следующая. Феррит имеет, в основном, полиэдрическую форму, перлитные колонии встречаются как мелкие, так и отдельные крупные равноосной формы (рис.2и). Бейнит имеет, в основном, зернистое строение.

Максимальная степень распада аустенита по диффузионной кинетике реализуется при скорости охлаждения, равной $0,033^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Температура начала распада аустенита на феррит максимальная и равна 815°C . В процессе дальнейшего охлаждения до 650°C наблюдается значительный рост скорости распада аустенита путем зарождения на границах зерен и их роста вглубь зерна без наличия ориентационной связи между исходной γ - и образующейся α -фазой. В интервале температур $650\text{--}620^{\circ}\text{C}$ переохлажденный аустенит распадается одновременно на феррит и частично на пер-

лит, общая степень распада аустенита составляет 80–85%. При этом, перлит образуется в количестве 10–12%. Оставшийся переохлажденный аустенит в интервале температур 620–450⁰С распадается с образованием 15–20% бейнита. Отсутствие перегибов на дилатограммах при более низких температурах свидетельствует о том, что распад остаточного аустенита на мартенсит не реализуется. Таким образом, при скорости охлаждения 0,033⁰С/с аустенит максимально распадается по диффузионной кинетике с образованием 68–75% полиэдрического феррита 6–8 балла стандартной шкалы по ГОСТ 5639 (рис.2к). Перлитные колонии встречаются как мелкие, так и крупные, растущие от границ зерен, степень распада на перлит составляет 10–12%. Степень распада остаточного аустенита на зернистый бейнит в виде отдельных полей без явно выраженной границы с ферритными зернами составляет 15–20%.

Микротвердость (максимальные и минимальные значения) дилатометрических образцов, подвергнутых аустенитизации при 960⁰С и охлаждению с различными скоростями приведена на рис.3.

Сравнительный анализ результатов ранее исследованной стали Св–08Г2С [1] с содержанием углерода 0,07% показал, что молибден при скорости охлаждения близкой к 0,1⁰С/с повышает микротвердость продуктов распада катанки. Если для стали Св–08Г2С она равна 1830–2100 Н/мм², то сталь Св–08ГНМ имеет микротвердость 2050–2350 Н/мм². Микротвердость катанки из стали Св–08ГНМ такая же, как и стали Св–08Г2С может быть получена только при охлаждении со скоростью 0,033⁰С/с.

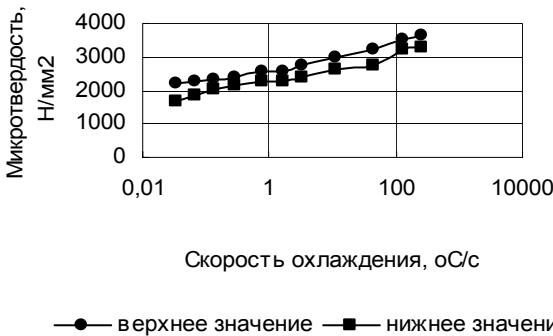


Рис.3. Микротвердость дилатометрических образцов, охлажденных после предварительной аустенитизации при 960⁰С в интервале скоростей 265–0,033⁰С/с

Кроме этого, исследовали и микротвердость отдельных крупных ферритных зерен в образцах, охлажденных со скоростью 0,033⁰С/с. Среднее значение микротвердости полиэдрического феррита составляет около 1700 Н/мм², что значительно ниже среднего значения микротвердости, равное 2140 Н/мм². Это свидетельствует о том, что молибден не оказал упрочняющего воздействия на твердость феррита. Эти результаты согласуются и с данными А.П. Гуляева [2] где он показал, что твердость феррита в низкоуглеродистых сталях зависит от типа легирования и скорости охлаждения. После закалки

меньше всего упрочняется феррит, легированный молибденом. При медленном охлаждении твердость феррита повышается мало при легировании хромом и молибденом, максимально при легировании кремнием, никелем и в меньшей мере марганцем. В отожженном состоянии такие элементы как молибден, никель, марганец и хром твердость феррита практически повышают очень мало.

Полученные экспериментальные результаты по кинетике распада аустенита показали, что молибден в исследуемой стали не влияет на температуру начала распада аустенита на феррит, однако, в значительной степени понижает скорость распада аустенита при дальнейшем охлаждении и сдвигает температурно–временной интервал распада аустенита вправо. Аустенит исследуемой стали обладает высокой устойчивостью и при распаде на перлит, так как первые участки перлита появляются только при скоростях охлаждения ниже $0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$. По данным работы П.Л. Грузина [3] это обусловлено с одной стороны тем, что молибден увеличивает прочность межатомных связей в кристаллической решетке железа, с другой стороны молибден замедляет диффузию атомов железа и углерода, что способствует уменьшению скорости распада аустенита как на феррит, так и на перлит при всех исследуемых скоростях охлаждения.

Однако, степень влияния молибдена при распаде переохлажденного аустенита на бейнит и мартенсит, образующихся по сдвиговому механизму, менее значительный. Максимальная температура начала распада аустенита на бейнит при скоростях охлаждения менее $0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$ равна $615\text{--}620^{\circ}\text{C}$, что практически совпадает с температурой начала распада аустенита в сталях с содержанием углерода менее $0,12\%$. Однако, температурно–временной интервал распада аустенита на бейнит по сравнению с углеродистыми сталями сдвинут вправо. При дальнейшем охлаждении со скоростями ниже $3,4^{\circ}\text{C}/\text{с}$ переохлажденный аустенит имеет малую устойчивость по сравнению со скоростью распада по диффузионной кинетике. На температурный интервал распада аустенита по сдвиговому механизму с образованием мартенсита молибден практически не оказал влияния.

Таким образом, построена термокинетическая диаграмма фазовых превращений в катанке из непрерывнолитой электростали Св–08ГНМ и проанализировано влияние молибдена на фазовые превращения в исследуемой стали.

1. *Перетворення аустеніту в сталі Св–08Г2С при безперервному охолодженні*/ В.В. Парусов, М.П. Бугаєць, С.Ю. Жукова и др. // *Металознавство та обробка металів*. – 2006. – № 1. – С.9–13.
2. *А.П. Гуляев*. *Металловедение* // 5–е издание. –М.: *Металлургия*, 1977. – 648 с.
3. *П.Л. Грузин*. *Некоторые закономерности диффузии и распределения элементов в сплавах*. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. –1960. – № 10. – С.5–13.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук, проф. И.Г.Узловым